ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

на правах рукописи УДК 629.332

Петровский Сергей Валерьевич

БОРТОВОЙ КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ АВТОМОБИЛЯ

Специальность 05.09.03-«Электротехнические комплексы и системы»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук, доцент, Козловский В.Н.

СОДЕРЖАНИЕ

| Списо | к аббревиатур | 4 |
|-------------|--|----|
| Введе | ние | 6 |
| | 1 Анализ электромагнитной совместимости батарейной системы ания автомобиля | 13 |
| 1.1 зажи | Проблема электромагнитной совместимости батарейных систем игания | 14 |
| 1.2 | Анализ рабочих процессов в батарейных системах зажигания | 17 |
| 1.3 элек | Источники возникновения и пассивные методы уменьшения тромагнитных помех | 19 |
| 1.4 | Способы распространения электромагнитных помех | |
| 1.5 обес | Управление двигателем внутреннего сгорания как способ спечения электромагнитной совместимости | 29 |
| 1.6 сист | Влияние тока накопления на электромагнитную совместимость тем зажигания | 34 |
| 1.7 зажи | Эмпирические данные по электромагнитным помехам от системы игания автомобилей | 37 |
| 1.8 треб | Использование систем искусственного интеллекта для обеспечения бований по электромагнитной совместимости | |
| 1.9 инте | Виртуализация диагностических процессов посредством еллектуальных датчиков | 50 |
| 1.10 | Выводы по главе | 61 |
| | 2 Моделирование источника электромагнитных помех от системы ания автомобиля | 63 |
| | Экспериментальные исследования характеристик системы зажигани адаптации математических моделей | |
| 2.2 | Анализ существующих математических моделей дуговых процессов | |
| 2.3 элек | Улучшение математической модели дуговых процессов для анализа тромагнитной совместимости системы зажигания | |
| 2.4 ot c | Математическое моделирование источника электромагнитных поме истемы зажигания | |
| 2.5 E | Выводы к главе | 85 |
| | 3 Интеллектуальная диагностика причин ухудшения параметров омагнитной совместимости у систем зажигания автомобиля | 86 |
| 3.1 элек | Разработка концептуальной модели диагностики трооборудования на базе интеллектуально-информационных систем | |

| 3.2 Интеллектуально-информационная система для диагностики | |
|--|-----|
| состояния электрооборудования автомобиля | 95 |
| 3.3 Экспериментальное исследование на базе интеллектуально- | |
| информационных систем | 113 |
| 3.4 Выводы по главе | 119 |
| Глава 4 Реализация интеллектуальных датчиков в составе интеллектуаль | |
| диагностического комплекса для электромагнитной совместимости систе | емы |
| зажигания | 121 |
| 4.1Классификация интеллектуально-информационных систем | 122 |
| 4.2Архитектура и функциональные возможности интеллектуального | |
| диагностического комплекса | 128 |
| 4.3 Экспериментальный анализ алгоритмических возможностей | |
| интеллектуального диагностического комплекса | 138 |
| 4.4 Выводы по главе | 149 |
| Библиографический список | 153 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | 167 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б | 172 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В | 176 |

СПИСОК АББРЕВИАТУР

АБС алгоритм ближайших соседей

АКБ аккумуляторная батарея

АЦП аналого-цифровой преобразователь

БС байесовские сети

БСК бортовые системы контроля

БДС бортовая диагностическая система

ВП вторичная переменная

ВВ вероятностные вычисления ВВП высоковольтные провода ВВЦ высоковольтная цепь верхняя мертвая точка ГА генетические алгоритмы

ДВС двигатель внутреннего сгорания ДД диагностика на основе данных

ДКН диагностические коды неисправностей

ДССА диагностическая система состояния автомобиля

ДЭС динамическая экспертная система

ИД интеллектуальный датчик

ИДК интеллектуальный диагностический комплекс

ИИ искусственный интеллект

ИИП интеллектуальный интерфейс пользователя ИИС интеллектуально-измерительная система

ИНС искусственная нейронная сеть

МТУА метод группового учёта аргументов ММ математическое моделирование

МОВ метод опорных векторов

МЭК международная электротехническая комиссия

НМТ нижняя мертвая точкаНЗ накопленные знания

ОЗУ оперативное запоминающее устройство ОКН обнаружение и классификацию неполадок постоянное запоминающее устройство

ПО программное обеспечение ППЭ помехоподавляющий элемент

РП радиочастотные помехи РТС радиотехнические средства

СЗ система зажигания

СИСПР международный стандарт по электромагнитным помехам

СНЛ системы нечеткой логики СПТ системы подачи топлива

СТО станция технического обслуживания

СУД система управления двигателем

УОЗ угол опережения зажигания

УФУС устройства фиксации уровня сигнала

ФП функция принадлежности

ЦАП цифро-аналоговый преобразователь

ЭБУ электронный блок управления ЭВ эволюционные вычисления ЭМВ электромагнитное возмущение

ЭМП электромагнитные помехи

ЭМС электромагнитная совместимость

ЭП электромеханические преобразователи

ЭС экспертная система

OLAР технология оперативного анализа данных

Введение

Статистические данные, полученные по результатам продолжительной эксплуатации легковых автомобилей, показывают, что 30-35% отказов техники вызвано поломкой компонентов И деталей системы электрооборудования, которые определяются в значительной степени плохой электромагнитной обстановкой. В этом ряду особое место занимают устройства, которые имеют составе В своем электромеханические преобразователи (ЭП). Примерами таких устройств являются системы зажигания, стартеры, генераторы, электромеханические усилители рулевого электроприводы стекол. Работа подобных современном легковом автомобиле вызывает значительную долю нарушений работоспособности, составляющую около 50% в общем объеме отказов системы электрооборудования, а этот факт уже определяет показатели качества и надежности автомобиля.

Поломка или нарушение функционирования технических устройств системы электрооборудования, к примеру, системы зажигания, влечет за собой не только ухудшение стабильности его работы, но и напрямую ухудшает безопасность, экономичность и экологичность при эксплуатации автомобиля. В настоящее время все более усиливается проблема электромагнитной совместимости зажигания системы электрооборудованием автомобиля, внутри И вне что приводит необходимости увеличения затрат на эксплуатацию транспортного средства. По этой причине качество и надежность работы любого технического устройства, в том числе и при воздействии электромагнитных помех, закладывается уже на этапе проектирования и обеспечивается в процессе его производства и эксплуатации.

Актуальность работы. Системы зажигания (СЗ) являются неотъемлемой частью двигателей внутреннего сгорания (ДВС), к производству и эксплуатации которых предъявляются всё более и более строгие требования. Общее число автомобилей в мире уже превысило 1,2

миллиарда единиц, поэтому производители должны, в числе множества требований, обеспечить электромагнитную совместимость (ЭМС) систем зажигания с другим электрооборудованием как внутри автомобиля, так и снаружи. От этого зависит безотказность работы двигателя и бортовых систем автомобиля.

Применение автомобилей в жизни человека имеет как положительные (удобство, высокий уровень мобильности и т.д.), так и негативные стороны, одна из которых — генерируемое от системы зажигания электромагнитное излучение. Данный вид излучения практически всегда преобладает над другими помехами в районах интенсивного автомобильного движения вблизи от автодорог. При этом основной парк автотранспорта составляют автомобили с ДВС, оснащенные СЗ.

Система зажигания в момент разряда на свече создает паразитное электромагнитное поле, представляющее собой во временной области последовательность импульсов со случайной амплитудой и длительностью от 200 нс, то есть широкополосные радиопомехи. Спектр электромагнитных помех (ЭМП) данного типа находится в пределах от 30 МГц до 1 ГГц, что негативно влияет на работу электрооборудования автомобиля, так как вносит паразитную составляющую ЭМП по приемопередающим телевизионным и аудиоканалам. Известно, что чем сложнее система, тем она более уязвима к электромагнитным помехам и, по этой причине, требуется больше затрат для обеспечения устойчивой ее работы в условиях действия ЭМП.

На основании изложенного выше, проблема ЭМС автомобильной СЗ является важной. Уже на этапах разработки автотранспортного средства (АТС) конструкция системы зажигания проектируется с учетом требований обеспечения предельно допустимого уровня по излучаемым помехам, поэтому необходимо контролировать и обеспечивать соответствие требованиям ЭМС по уровню излучаемых ЭМП от автомобилей, находящихся в эксплуатации. Это может быть достигнуто путем разработки и реализации научнопрактического комплекса, включающего: математические модели, которые

описывают разрядные процессы в свече зажигания с последующим переходом к моделированию ЭМП; электротехнический и электронный интеллектуально - диагностический комплекс (ИДК) реализующий методы и алгоритмы уменьшения уровня разрядных помех.

Объект исследования — система зажигания современных легковых автомобилей (на примере автомобилей семейств ЛАДА «Калина», «Приора»).

Предмет исследования — вопросы диагностики уровня электромагнитных помех от системы зажигания легковых автомобилей.

Цель работы. Совершенствование электромагнитной совместимости автомобиля за счет разработки и реализации бортового комплекса диагностики обеспечивающего минимизацию уровня излучаемых электромагнитных помех от системы зажигания.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

- 1 Получение экспериментальных характеристик дуговых процессов в системах зажигания автомобилей;
- 2 Адаптация математической модели дуговых процессов в системе зажигания автомобилей к экспериментальным данным;
- 3 Создание математической модели источника электромагнитных помех, связанных с дуговыми процессами в системе зажигания;
- 4 Концептуальное проектирование универсального диагностического комплекса, способного классифицировать причины повышенного уровня помех;
- 5 Разработка интеллектуально-информационных инструментов диагностики неисправностей СЗ для обеспечения электромагнитной совместимости электрооборудования автомобиля с системой зажигания;
- 6 Апробация интеллектуальных датчиков в составе диагностического комплекса ЭМС электрооборудования автомобиля в контексте решения диагностических задач.

Методы исследования. При решении проблемы обеспечения электромагнитной совместимости системы зажигания легковых автомобилей использовались методы математической статистики, теории точности, теории вероятностей, математическое и имитационное моделирование, методы планирования эксперимента.

Основу исследований составляет электронная база данных, полученная в условиях специализированной лаборатории ЭМС ОАО «АВТОВАЗ», по результатам экспериментальных исследований уровня ЭМС для автомобилей ЛАДА «Калина» и «Приора», в период 2010 – 2014 гг.

Научная новизна выполненного исследования состоит в следующем:

- 1 Разработана математическая модель дуговых процессов в свече зажигания автомобиля;
- 2 Сформулирована и исследована математическая модель электромагнитных помех в зависимости от параметров системы зажигания;
- 3 Предложена концепция универсального диагностического комплекса, способного по эмпирическим данным классифицировать причины повышенного уровня помех и обладающего возможностями адаптации и обучения;
- 4 Спроектированы интеллектуально-информационные инструменты диагностики неисправностей электрооборудования, связанные с электромагнитными помехами и основанные на анализе эмпирических данных.

Практическая значимость работы.

- 1 Разработана методика и реализующий ее комплекс алгоритмов и программ, осуществляющий интеллектуальный анализ эксплуатационных данных автомобилей по уровню ЭМП СЗ и обеспечивающий идентификацию отклонений ЭМС.
- 2 Разработанный программный комплекс идентификации отклонений ЭМС реализован в виде программных кодов в контроллере электронной системы управления двигателем.

Реализация результатов работы.

Разработанная математическая модель электромагнитных помех от системы зажигания автомобиля, применяется в ОАО «АВТОВАЗ» для разработки программного кода электронного блока управления двигателем внутреннего сгорания и оптимизации процесса его настройки. Концептуальная модель интеллектуального диагностического комплекса взята за основу при разработке идеи адаптивного регулирования уровня электромагнитных помех для перспективных проектов АТС производства ОАО «АВТОВАЗ».

В научно-исследовательском центре «IDEAS» университета Роберта Гордона (Великобритания), получено практическое применение разработанных интеллектуально-информационных инструментов диагностики неисправностей, связанных с ЭМС СЗ электрооборудования автомобилей.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» электротехнического факультета ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплине «Применение микропроцессорных и информационно-измерительных систем в электрооборудовании автомобилей».

Обоснованность и достоверность научных положений, рекомендаций, а также практических выводов подтверждены применением предложенного в работе интеллектуального диагностического комплекса для системы определения превышения уровня помех, а также экспериментальной проверкой результатов на стенде СПЗ-16, для автомобилей LADA 11176, ВАЗ 2170, в сертифицированной лаборатории электромагнитной совместимости дирекции по развитию ОАО «АВТОВАЗ».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на: международных конференциях: «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань, РГРТА, 1999-

2000), «Молодые ученые – науке, технологиям и профессиональному образованию для устойчивого развития: проблемы и новые решения» (Москва, 1999 часть III), «Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте» (Самара, СамГТУ, 1999), «Микроэлектроника и информатика – 2000» (Зеленоград, МИЭТ, 2000), «Актуальные проблемы университетского образования» (Самара, СамГТУ, 2000), «ІМА Conference on Advanced for Simulation and Control Automotive Applications» (Оксфорд, Великобритания, 2001), «ICATS 01» (Казань, КГТУ-КАИ, 2001), «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, ТГУ, 2006), «IEEE International Symposium on Innovation sin Intelligent Systems and Applications (INISTA 2013)» (Албена, Болгария, 2013), конференции по безопасности информации и компьютерных сетей «The 8th International Conference on Security of Information and Networks» (Сочи, Россия, 2015); заседаниях научно-технических семинаров кафедр «ТОЭ» и «Электрические станции» Сам ГТУ.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 44 печатные работы, в том числе: 9 в изданиях по списку ВАК, 1 патент на полезную модель.

Основные положения, выносимые на защиту.

- 1 Адаптированная к экспериментальным данным математическая модель дуговых процессов в свече зажигания автомобиля.
- 2 Математическая модель источника электромагнитных помех от системы зажигания автомобиля.
- 3 Интеллектуально-информационные инструменты диагностики неисправностей электрооборудования, связанные с электромагнитными помехами и основанные на анализе эмпирических данных.
- 4 Алгоритмические решения по настройке параметров интеллектуально-информационных инструментов диагностики с использованием методов машинного обучения.

5 Концепция универсального диагностического комплекса, способного по эмпирическим данным классифицировать причины повышенного уровня помех и обладающего возможностями адаптации к изменяющимся условиям функционирования.

Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.09.03 — «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует формуле специальности: «... принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного... и специального назначения».

Объект изучения: «электротехнические комплексы и системы, ЭМС системы зажигания, электрооборудование транспортных средств».

Область исследования соответствует пунктам: п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях», п.5 «Разработка безопасной и эффективной эксплуатации, утилизации и ликвидации электротехнических комплексов и систем после выработки ими положенного ресурса».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего наименование. Содержит 150 страниц основного текста, 52 иллюстрации, 8 таблиц, 15 стр. приложений. Библиографический список содержит 120 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ БАТАРЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ АВТОМОБИЛЯ

В настоящее время международная электротехническая комиссия (МЭК) определяет электромагнитную совместимость (ЭМС), как способность оборудования или системы удовлетворительно работать в данной электромагнитной обстановке без внесения в нее какого-либо недопустимого электромагнитного возмущения. Нарушение ЭМС происходит в том случае, если уровень помех слишком высок при недостаточной помехоустойчивости оборудования [43].

Проблеме ЭМС длительное время не уделяли должного внимания, пока не были зарегистрированы сбои в электрооборудовании самого различного назначения при воздействии помех. В настоящее время зависимость жизнедеятельности человека от используемой электроники и радиоаппаратуры настолько высока, что данная проблема становится предельно актуальной.

Электромагнитные помехи можно разделить на два типа: естественные и искусственные [3]. Искусственные помехи возникают в процессе человеческой деятельности, в то время как помехи естественного происхождения не связаны с жизнедеятельностью человека. Искусственные помехи, делятся на непреднамеренные и организованные. При этом непреднамеренные помехи возникают в процессе использования человеком различного рода устройств - в частности, батарейной системы зажигания, генерация помех от которой является естественным следствием её функционирования.

Организованные помехи создаются искусственно с целью ухудшения функционирования или вывода из строя радиоэлектронных средств (РЭС). Организованные помехи в данной работе не рассматриваются, но на практике они существуют, и по характеру своего воздействия на элементы РЭС во многом идентичны мощным непреднамеренным электромагнитным помехам.

По этой причине, чтобы указать основные практические аспекты обеспечения требований ЭМС РЭС, по классификации их обычно объединяют в единую группу с непреднамеренными помехами [4].

1.1 Проблема электромагнитной совместимости батарейных систем зажигания

В представленной к рассмотрению работе основными источниками мощных электромагнитных помех являются батарейные системы зажигания, электромагнитные помехи от которых возникают в двух фазах разряда между электродами свечи зажигания:

- 1. *емкостная* фаза с малой длительностью разряда (около 100 нс) и большими токами (несколько десятков ампер) мощность при этом составляет сотни киловатт, но энергия разряда из-за малой длительности невелика и составляет 3-10 мДж;
- 2. *индуктивная* фаза разряда с малыми токами разряда (30-100 мА) и большой длительностью времени разряда (1-2.5 мс); при этом мощность составляет десятки, даже сотни ватт, а энергия разряда на порядок выше, чем в емкостной фазе и варьируется в диапазоне 30-100 мДж.

Практическое решение проблем ЭМС упрощенно сводится к выявлению электромагнитной обстановки и определению помехоустойчивости оборудования. Исследовательская и практическая работа, а в этом направлении была проведена и нашла отражение, прежде всего, в создании нормативной базы в области ЭМС в таких международных организациях, как МЭК, СИСПР и им подобных [11,12].

Качественная работа электрооборудования конкретного автомобиля может потребовать сокращения уровня шума радиопомех, выраженной как в форме относительной мощности помех, так и в способности данного электрооборудования осуществлять подавление возникающих помех. Эти

требования различаются для разных автомобилей в зависимости от типа автомобиля и требуемого радиуса действия аппаратуры [50].

В данной работе кондуктивные помехи, регламентируемые ГОСТ 28751-90, не рассматриваются, так как в рассматриваемых системах зажигания практически нет узлов, наподобие высоковольтных проводов системы зажигания, где они могут распространяться. Между тем индуктивные помехи имеют наибольшее влияние при рассмотрении ЭМП от систем зажигания автомобилей. Индуктивные помехи регламентирует ГОСТ 28279-89, в данном стандарте устанавливаются нормы и методы измерений параметров ЭМП данного типа, создаваемых электрооборудованием автомобиля, и параметры помехозащищенности приемников от этих же помех в полосе частот от 0,15 до 110 МГц. Данный диапазон частот является основным в моей работе.

Влияние описанных выше индуктивных помех от системы зажигания проявляется в искажении изображения и появлении полос на экранах радаров, в возникновении акустических помех в выходных каскадах радиоприемных и передающих устройств. Наблюдались случаи, когда ЭМП от системы зажигания влияли на электронные бортовые системы, различные медицинские установки или приборы, приводя к перебоям в их работе или к поломке [11].

Усложнение данных систем, как известно, приводит к тому, что они становятся более чувствительными, в том числе и по отношению к электромагнитным помехам, что в свою очередь влечет дополнительные затраты для обеспечения устойчивости их работы в условиях все более усиливающихся помех. Помимо этого, многочисленные исследования, проведенные в разных странах, показали, что повышенный электромагнитный фон воздействует, в том числе и на биологические организмы, вызывая или усиливая у них различного рода функциональные изменения [50].

На основании вышеописанного очевидно, что проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) автомобильных систем зажигания является важной. В этом направлении непрерывно ведутся научные работы. Большой вклад в исследования по проблеме ЭМС автомобиля внесли как

отечественные, так и зарубежные ученые: В. А. Балагуров, Н. А. Володина, П.А. Николаев, М. В. Максимов, А. К. Старостин, А. Д. Князев, В. А. Набоких, В. И. Кириченко, В.Е. Ют, М.Н. Фесенко, В.П. Козловский, Donald R. J. White, D. Morgan, H. W. Ott, J. C. Gaddie, J. S. Hill, A. Shepherd, R. E. Taylor, Hideo Kasuya, и другие.

Уже на этапах разработки автомобиля, в том числе при помощи математического моделирования, проектируется конструкция системы зажигания с учетом обеспечения требований предельно допустимого уровня по излучаемым ею помехам. Для этого большинство ведущих производителей автомобилей имеют специализированные ЭМС центры, где проводятся исследовательские и испытательные рабочие программы.

С учетом накопленного опыта и новых тенденций совершенствуются региональные и международные стандарты по ЭМС. В настоящее время любая новая модель автомобиля в обязательном порядке сертифицируется на соответствие требованиям по уровню излучаемых электромагнитных помех, а в случае превышения установленных норм необходима обязательная доработка установленного оборудования, так как данное транспортное средство не может быть одобрено к эксплуатации. В России сертификацией ЭМП в автомобильной технике занимаются только в специализированном центре АвтоВАЗа (Тольятти) и в центре НИИАЭ в Москве.

Основной задачей предлагаемого к рассмотрению исследования является исследование подходов к уменьшению уровня излучаемых электромагнитных помех (ЭМП) от автомобилей и к контролю этого уровня для его соответствия требованиям по ЭМС находящегося в эксплуатации автомобильного электрооборудования. Данная научно-техническая задача является актуальной и практически значимой, поэтому для её решения сначала разрабатываются математические модели, описывающие разрядные процессы, а затем методы и алгоритмы диагностики повышенного уровня разрядных помех. После этого предлагается подход к оценке качества заложенных решений с последующей возможностью применения новых способов

подавления ЭМП. Для разработки математических моделей разрядных процессов необходим анализ рабочих процессов в системах зажигания.

1.2 Анализ рабочих процессов в батарейных системах зажигания

В транзисторной и микропроцессорной системах зажигания (СЗ), выдвигаются дополнительные требования к системным параметрам, поэтому имеется ряд особенностей рабочего процесса, который протекает в два этапа [6, 84]:

1. Отпирание транзистора: после подачи тока управления на базу выходного транзистора последний отпирается и через проводящий участок коллектор-эмиттер подключает первичную обмотку катушки зажигания к источнику постоянного тока. Начинается процесс нарастания тока накопления и запасания энергии в магнитном поле катушки зажигания, как показано на рисунке 1.1.

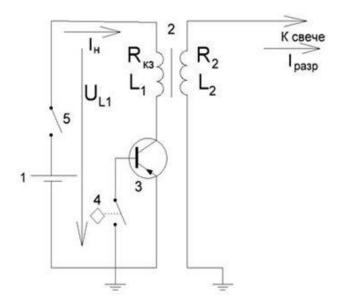


Рисунок 1.1 - Принципиальная схема системы зажигания

На вышеприведённом рисунке использовались следующие обозначения: 1 -аккумуляторная батарея, 2-катушка зажигания, 3- коммутирующий элемент, 4-датчик положения коленчатого вала, 5-выключатель зажигания, L_1 , L_2 - индуктивность первичной и вторичной обмоток катушки зажигания, $R_{\rm K3}$, R_2 - сопротивления первичной и вторичной обмоток катушки зажигания, U_{L1} —

напряжение аккумуляторной батареи с учетом падения напряжения на зажимах коммутирующего элемента, $I_{\rm H}$ — ток накопления, протекающий через первичную обмотку катушки зажигания.

Ток накопления выражается формулой:

$$I_{H} = \frac{U_{L_{1}}}{R_{K3}} \left(1 - e^{-\frac{R_{K3}}{L_{1}}t} \right) \tag{1.1}$$

2. Запирание и от сечка транзистора: особенностью переходных процессов в транзисторной или микропроцессорной системах зажигания является их зависимость от электрических характеристик и инерционных свойств транзистора. Процессы запирания и отсечки (полное запирание) транзистора могут влиять на вторичное напряжение катушки зажигания. В зависимости от характера нагрузки транзистора (активная, емкостная, индуктивная или смешанная) движение его рабочей точки, показывающей изменение мгновенного значения тока коллектора и напряжения $U_{\kappa 9}$ транзистора, в процессе запирания проходит по-разному.

После запирания транзистор переходит в режим отсечки, начинается процесс обмена энергии между магнитным и электрическим полями катушки зажигания, и в первичной обмотке возникают затухающие колебания с максимальной амплитудой U_{1m} . Далее, так как катушка зажигания является трансформатором, на вторичной обмотке возникает напряжение $U_{2m} = U_{1m} \cdot K_{\mathrm{Tp}}$, которое приводит к пробою между электродами свечи зажигания и поджигает топливовоздушную смесь, где $K_{\mathrm{Tp}} = \frac{w_2}{w_1}$, где w_1 и w_2 –это число витков первичной и вторичной обмоток катушки зажигания соответственно.

Важным параметром при анализе разрядных процессов является вторичное напряжение, максимальное значение которого делается в среднем в два раза больше, чем напряжение пробоя на свече зажигания, для того, чтобы свеча надежно работала требуемое время [84]. Максимальное значение вторичного напряжения (U_{2m}) определяется по формуле (1.2):

$$U_{2m} = I_{H} \frac{w_{2}}{w_{1}} \sqrt{\frac{L_{1}}{C_{1} + C_{2} \left(\frac{w_{1}}{w_{2}}\right)^{2}}}$$
(1.2)

При протекании тока накопления через первичную обмотку катушки зажигания (КЗ) и тока разряда между электродами свечи зажигания во вторичной обмотке КЗ возникают электромагнитные помехи, затрудняющие работу электрооборудования в самом автомобиле и снаружи. Для эффективной борьбы с этими помехами, необходимо сначала попытаться выявить их источники и возможные методы уменьшения негативного воздействия на автомобильное электрооборудование.

1.3 Источники возникновения и пассивные методы уменьшения электромагнитных помех

Выявление источников электромагнитных помех (ЭМП) представляет собой первый этап процесса помехоподавления, так как правильная идентификация источника ЭМП значительно упрощает решение задачи обеспечения ЭМС систем автомобиля.

При отсутствии специализированного устройства обнаружения электромагнитных помех, идентификация их источников и интенсивности осуществляется при помощи устройства фиксации уровня сигнала (УФУС), подсоединенного к портативному радиоприемнику, который работает в диапазоне служебной радиосвязи или радиостанции. Работа устройства происходит на частоте, близкой к частоте установленной радиостанции, но от изолированного источника питания, при этом устройство перемещается по автомобилю, используя радиоприемник в качестве детектора излучения ЭМП. Следует отметить, что УФУС должно быть хорошо изолировано для предотвращения непосредственного соприкосновения входного разъема радиоприемника с участками высокого напряжения в системе зажигания

автомобиля. В электрических цепях, которые требуют дополнительной фильтрации сигнала, могут применяться конденсаторы [86].

Важно отметить, что проверка электрооборудования автомобиля (системы зажигания, вентиляторов, нагнетателей воздуха, двигателей оконных стекол, выключателей фар, сигналов поворота, стеклоочистителей и так далее), а также проверка специальной аппаратурой наличия помех [14]в принимаемом радиосигнале не позволяет точно выявить источник электромагнитной помехи. Наведенные помехи могут быть обусловлены слишком близким расположением проводов радиостанции к другим проводам автомобиля.

Подобные проблемы ЭМС являются комплексными и подразделяются на стадии выявления электромагнитных помех, их классификации, то есть определения наиболее вероятного источника помех, и определения наиболее эффективного метода их устранения. Например, проблема наведенных помех от проводов радиостанции к другим проводам автотранспортного средства (АТС) с наименьшими затратами решается при правильной прокладке экранированного кабеля при установке аппаратуры.

Система зажигания автомобиля, как правило, является основным источником наведённых электромагнитных помех, на уровень которых в некоторых случаях основное влияние оказывает расположение антенны.

Исходя из изложенного выше, можно сделать вывод о необходимости компенсации электромагнитных помех для удовлетворения требований по ЭМС автомобильного электрооборудования.

Существуют три основных метода пассивной компенсации ЭМП. Первый метод заключается в установке дополнительного резистора в цепях, склонных к формированию переходных процессов — в частности, этот метод, применяется для высоковольтного кабеля катушки зажигания, проводов свечей зажигания и самих свечей зажигания [86].

Второй метод использует фильтрацию сигнала шума от низковольтных проводников за счет применения коаксиальных развязывающих конденсаторов.

Третий метод управляет процессом разряда статического электричества с помощью применения контактных щеток для подвижных узлов (например, автомобильные капоты и крышки багажника) и гибких заземляющий перемычек для неподвижных узлов, таких как кузов автомобиля и ДВС.

Следует также отметить помехи OT катушки зажигания, сопровождающиеся специальным звуком, фиксируемым УФУС или другой специальной аппаратурой, наиболее заметного при работе двигателя на малых оборотах. Для подавления данной помехи подсоединяется коаксиальный конденсатор ёмкостью 0,1 мк Φ между выводом катушки зажигания со стороны аккумуляторной батареи и заземлением автомобиля (это либо кузов, либо двигатель). Использование помехоподавляющего конденсатора предотвращает распространение ЭМП от системы зажигания через клемму аккумуляторной батареи в другие системы электрооборудования автомобиля [86].

Опыт эксплуатации различных систем зажигания показывает[11, 40], что применение всех перечисленных методов подавления помех не дает требуемого уровня защиты, так как используемые помехоподавляющие элементы, такие как резисторы и конденсаторы, имеют статические значения, в то время как параметры работы системы зажигания постоянно меняются. При этом если, к примеру, задать ёмкость помехоподавляющего конденсатора максимально возможной, то это приведет к снижению вторичного напряжения вплоть до пропусков зажигания. По этой причине нужен качественно новый подход к проблеме повышенного уровня помех, без которого невозможна надежная эксплуатация систем зажигания.

Как показывает практика [3, 4,12, 14], из-за несоблюдения требований ЭМС при проектировании, монтаже и эксплуатации инженерных объектов, относящимся к индустриям автомобилестроения, энергетики, и некоторым

другим, имеют место случаи нарушения функционирования этих объектов с серьезными экономическими последствиями. В частности, проведенное тестирование мобильной связи показало, что около 50% соединений вблизи от автотрасс признано неудовлетворительными из-за электромагнитных помех [50].

Система зажигания (СЗ) является исполнительным механизмом, работа которой напрямую влияет на уровень ЭМП. При этом СЗ в основном характеризуется такими параметрами как минимальная энергия разряда W_{pmin} =35 мДж (при обычной величине около 70 мДж) и ток накопления $I_{\rm H}$, находящийся в диапазоне от 5.5 до 8 (А) для разных систем зажигания. Ток накопления связан с энергией зажигания по формуле $W_{\rm p} = L \cdot I_{\rm H}^2/2$, поэтому если уменьшение энергии разряда возможно до 2 раз (с 70 до 35 мДж), то при этом соответствующее уменьшении тока накопления $I_{\rm H}$ будет в 1.4 раза, из-за квадратичной зависимости $W_{\rm p}$ от $I_{\rm H}$. Соответственно при уменьшении тока накопления $I_{\rm H}$ будет падать уровень ЭМП.

На рабочем участке от 0 до 10 (A) ток накопления линейно зависит от времени накопления, что способствует плавному управлению током накопления с помощью электронного блока управления или систем, в него входящих. При этом производится уменьшение энергии разряда между электродами свечи зажигания, что позволяет пропорционально уменьшить и уровень электромагнитных помех от системы зажигания.

Для регулирования уровня помех также важно понимать, как происходит их распространение - иными словами, по каким средам и каналам происходит передача помехообразующих сигналов.

1.4 Способы распространения электромагнитных помех

При диагностике электромагнитной совместимости (ЭМС) систем зажигания важно учитывать, что распространение помехи может происходить тремя способами:

- 1. как кондуктивная связь через паразитные цепи;
- 2. при помощи индукционной связи.

Следует отметить, что индуктивная связь встречается реже, чем кондуктивная. Требования к электромагнитным помехам, как излучаемым, так и кондуктивным, применимы ко всем системам зажигания.

В бортовой сети на различные электронные устройства воздействует помеха, которая является суммой всех составляющих, созданных в низковольтном и в высоковольтном контурах системы зажигания. Описанные в предыдущем разделе методы помехоподавления недостаточно эффективны или слишком дороги (например, электромагнитное экранирование), что делает необходимым применение дополнительных методов уменьшения помех.

Методы уменьшения кондуктивных помех. Как было указано в разделе 1.1, кондуктивные помехи в данной работе не рассматриваются. Однако в некоторых системах зажигания катушки зажигания не являются индивидуальными, и как следствие этого, для распределения высоковольтных импульсов от системы зажигания нужны высоковольтные провода, по которым, в частности, данный тип помех распространяется. Поэтому кратко опишем влияние этого типа ЭМП. Кондуктивные помехи от СЗ сосредоточены в области с верхней границей частот до100 МГц. Для современных систем зажигания напряжение сигнала, созданного в низковольтной цепи при разрыве тока накопления, находится в диапазоне от 300 до 500 В.

Важно отметить, что для точного расчета амплитуды кондуктивной помехи от высоковольтного контура нужно учитывать распределенные параметры бортовой сети, геометрию подкапотного пространства, которая влияет на распределение излучаемых электромагнитных помех, и многое

другое. Поэтому в связи со сложностью расчета, намного целесообразней основываться на статистических результатах экспериментальных исследований. В процессе проведения этих установлено, что максимальная амплитуда кондуктивной помехи от высоковольтной цепи не превышает 100-140 (В) [5, 50].

Основываясь на приведенных значениях, можно выбрать помехоограничительные устройства с требуемыми параметрами. Так, в частности, ограничительные устройства, устанавливаемые в силовые цепи системы зажигания, наиболее часто в своем составе включают варисторы - в более редких случаях в качестве ограничительного элемента выступает стабилитрон [35,50].

Для фильтрации ЭМП от СЗ применяются реактивные помехоподавляющие элементы: индуктивности $L_{\rm II}$ и конденсаторы $C_{\rm II}$ с различными способами включения. Качество заземления может быть улучшено за счет дополнительного заземления ДВС на кузов транспортного средства, как показано на рисунке 1.2 [50].

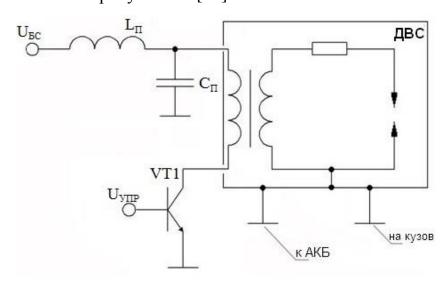


Рисунок 1.2 - Включение помехоподавляющих элементов

Помехоподавляющие конденсаторы включаются в цепь питания. Для эффективного подавления ЭМП необходимо, чтобы вывод обкладки конденсатора, подсоединяющийся к плюсу СЗ, располагался на минимальном

расстоянии от катушки, а его провода должны быть максимально короткими. Все это дает положительный эффект в области частот до 100~MFц и обеспечивает в некоторых диапазонах спектра подавление помех до 18-26~дБ [50].

В то же время, при неправильной установке конденсатора возможно возникновение резонанса, что наоборот приводит к увеличению амплитуды помех в соответствующих частотных диапазонах, проиллюстрированных на рисунке 1.3 [35].

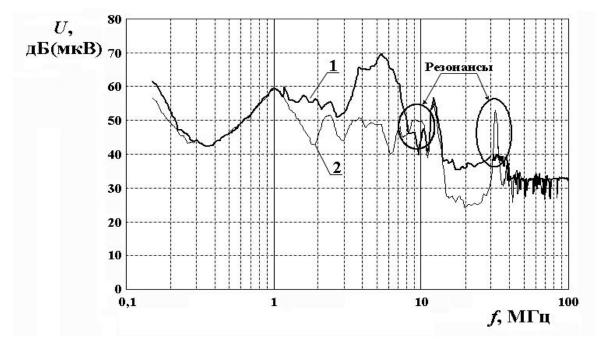


Рисунок 1.3 - Амплитудно-частотная характеристика напряжения помех от системы зажигания в бортовой сети автомобиля ВАЗ 21703:

1 -без конденсатора; 2 -с конденсатором

При подключении помехоподавляющей индуктивности $L_{\rm II}$ к входу низковольтной части СЗ для подавления помех необходимо учитывать особенности, связанные с накоплением энергии, так как при наличии дополнительной индуктивности увеличивается постоянная времени цепи, а также изменяются параметры, определяющие энергетические соотношения катушки зажигания. Как правило, величина данной индуктивности выбирается из условия, что она составляет не более 5% от значения индуктивности первичной обмотки катушки зажигания L_1 - иными словами, в современных

автомобильных системах зажигания, величина $L_{\rm II}$ составляет несколько десятков мк Γ н [50].

Показанные на рисунке 1.2 методы подавления помех от системы зажигания также включают в себя метод оптимизации заземления ДВС на кузов автомобиля. Этот метод достаточно широко распространен в серийно выпускаемых автомобилях (Ford Mondeo, Audi A4, отечественных моделях «Калина», «Приора» и ряда других). Оптимизация заземления, фактически реализуемое как дополнительное заземление, обеспечивает равномерность распределения по поверхности ДВС нулевого потенциала, что соответственно приводит к снижению уровня ЭМП [50].

Следует отметить, что применение более двух дополнительных заземляющих проводов нецелесообразно, так как увеличивается количество замкнутых контуров, которые, в свою очередь, являются магнитными антеннами и на них могут наводиться ЭМП. Дополнительное заземление ДВС работает в диапазонах длинных, средних и коротких волн [46, 50].

Для уменьшения уровня помех в высоковольтной цепи СЗ также применяется методы уменьшения величины разрядного тока, и экранирования источника излучения.

В настоящее время уменьшение высокочастотного разрядного тока достигается на практике с помощью введения помехоподавляющих элементов (ППЭ) в конструкцию свечей, катушек зажигания и высоковольтных проводов (ВВП), имеющих активное, реактивное или комплексное сопротивление. Разработано большое количество конструкций ППЭ для различных модификаций систем зажигания. При этом используемые методы построения ППЭ не позволяют эффективно бороться с излучаемыми помехами [46], что делает необходимым рассмотреть этот вопрос отдельно.

Методы уменьшения индуктивных помех. Уровень индуктивных помех можно уменьшить с помощью изменения высокочастотного импеданса и сокращения площади антенной петли, что обеспечивается путем

минимизации площади замкнутой антенной петли, которая образуется силовой линией и ее обратным каналом [12].

Слой заземления, расположенный на открытых участках, особенно если таковой расположен прямо под источником генерации помех, значительно уменьшает излучаемые электромагнитные помехи от системы зажигания.

Для дополнительного уменьшения излучаемых помех можно использовать металлические экраны, что дает возможность разместить источник генерации помех внутри заземленного проводящего корпуса. Интерфейс с внешней средой осуществляется через проходные фильтры, в которых синфазные шунтирующие конденсаторы расположены между проводящим корпусом и земляной шиной [12,30].

Кузов автомобиля не является сплошным, поэтому ЭМП в большей степени проходят во внешнюю среду через различные щели и отверстия. Для подавления ЭМП от автомобильной системы зажигания применяется экранирование, как всей системы зажигания, так и отдельно каждого высоковольтного контура. Однако вышеуказанных методы подавления ЭМП по ряду причин могут оказаться недостаточными для борьбы текущим уровнем помех, и тогда необходимы дополнительные методы уменьшения помех на системном уровне, что осуществляется через управление двигателем внутреннего сгорания посредством изменения характеристик режима его работы [35], о чём будет подробнее рассказано в следующем разделе.

Также следует подчеркнуть, что все системы зажигания проектируются в соответствии с требованиями стандартов [18, 19-21], по электромагнитным помехам, определяющим нормы допустимых уровней ЭМП в различных частотных диапазонах. Компонентами системы, при проектировании которых следует уделить особое внимание цели снижения ЭМП, являются катушка зажигания, свеча зажигания и высоковольтный провод.

Базируясь на анализе помех, генерируемых в процессе работы системы зажигания в различных режимах работы ДВС с микропроцессорным

управлением, были предложены два основных метода уменьшения помех посредством управляющих воздействий [17, 50].

В основе первого метода лежит принцип изменения угла опережения зажигания (УОЗ). Данный метод применим при малых превышениях помехами предельно допустимого уровня, так как величина УОЗ ограничивается условием обязательного попадания в определенный диапазон углов $\theta \in (10 \div 30 \text{ град.})$, в которых необходимо формирование максимума давления газов на поршень. Нарушение указанного условия приводит к ухудшению показателей рабочего процесса.

На основании результатов диагностики уменьшение уровня помех от системы зажигания можно осуществлять по отдельным высоковольтным цепям. Возможность реализации предлагаемого метода подтверждена экспериментально – при его правильном использовании уровень помех можно снизить на 5 дБ; при этом с позиции практической применимости УОЗ целесообразно увеличивать[50].

Второй метод основан на увеличения *числа оборотов* ДВС. Причем выбор диапазона оборотов, в котором используется обратная связь по разрядным помехам, производится с учетом того, что наибольшая мощность электромагнитных помех приходится на область минимальных оборотов холостого хода ДВС [46, 50]. Ограничением этого метода уменьшения ЭМП через управляющие воздействия ДВС является то, что он не может применяться на установившихся режимах работы двигателя при включенной передаче ввиду вероятного неконтролируемого изменения скорости движения автомобиля.

Превышение предельно допустимых норм электромагнитных помех от автомобильных систем зажигания интерпретируется как неисправность и, устраняется микропроцессорной системой управления ДВС посредством уменьшения уровня разрядных помех [35]. При этом повышенный уровень ЭМП, излучаемых системой зажигания, может быть диагностирован, а затем

уменьшен до требуемого значения, используя описанные в следующем разделе методики управления двигателем.

1.5 Управление двигателем внутреннего сгорания как способ обеспечения электромагнитной совместимости

Система управления двигателем является многопараметрической - к числу основных управляемых переменных относятся температура двигателя (в том числе скорость её изменения), состав топливовоздушной смеси λ и некоторые другие. В частности, скорость нагревания ДВС, показанная на рисунке 1.4, и топливовоздушное соотношение (λ) проиллюстрированное на рисунке 1.5, зависят от нагрузки на двигатель и от частоты вращения коленчатого вала [38, 39, 74].



Рисунок 1.4 - Зависимость скорости нагревания двигателя от нагрузки и от частоты вращения коленчатого вала

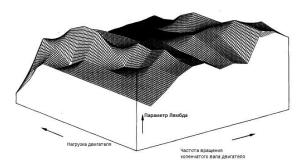


Рисунок 1.5 - Зависимость топливовоздушного соотношения (λ) от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала

Помимо вышеуказанных, важным управляющим фактором для снижения уровня ЭМП, как уже было отмечено в предыдущем разделе, является угол опережения зажигания (УОЗ), также зависящий как от частоты вращения коленчатого вала, так и от температуры двигателя и нагрузки на него. Многофакторность зависимостей УОЗ показана в виде характеристических карт, представленных на рисунках 1.6 и 1.7.

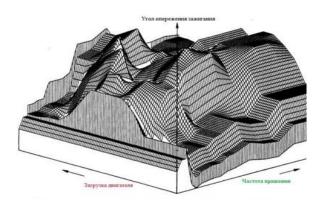


Рисунок 1.6 - Зависимость угла опережения зажигания от нагрузки и частоты вращения ДВС

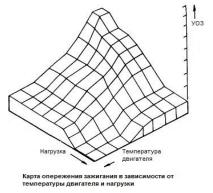


Рисунок 1.7 - Характеристическая карта угла опережения зажигания в зависимости от нагрузки и температуры двигателя

Из вышеуказанных рисунков [74] видно, что показанные на них зависимости сложны и многомерны, и для обработки этих зависимостей требуется мощные вычислительные ресурсы не всегда доступные бортовым системам управления ДВС.

Таким образом, управление двигателем внутреннего сгорания — это сложная, многоступенчатая задача. При этом по мере увеличения нагрузки и частоты вращения ДВС, несмотря на поддержание практически постоянного топливовоздушного отношения, рабочая смесь переходит в состояние турбулентности, приводящее к срыву дугового канала в свече зажигания. Это требует увеличения энергии искры для надежного зажигания смеси, но при увеличении энергии искры возрастает уровень помех от системы зажигания. При этом электромагнитная совместимость (ЭМС) системы зажигания ухудшается и требуется корректировка по уровню помех.

Для корректировки уровня помех от системы зажигания нужно регулировать ток накопления, а это одна из характеристик системы управления двигателем (СУД), которые записаны в характеристической карте электронного блока управления (ЭБУ), являющегося частью СУД. Характеристическая карта, записанная в ПЗУ электронного блока управления, сложна (рисунки 1.4 – 1.7), деталей и реальные статична, не отражает износ эксплуатационные характеристики двигателя. Поэтому, ЭМС системы зажигания с автомобильным электрооборудованием с течением времени ухудшается. Чтобы оценить, а по возможности и уменьшить данное ухудшение, целесообразно провести математическое моделирование дуговых процессов в свече зажигания и сравнить модели с экспериментальными характеристиками, полученными в ходе исследований, которые будут описаны во второй главе диссертационной работы.

Все получаемые данные по вышеперечисленным характеристикам поступают в электронный блок управления (ЭБУ), который собирает информацию с множества входных датчиков, обрабатывает её в соответствии с определенным алгоритмом И посылает управляющие воздействия устройства различных исполнительные систем двигателя. Применение электронного регулирования позволяет оптимизировать основные параметры двигателя для различных режимов работы, такие как мощность, крутящий момент, расход топлива, состав отработавших газов и так далее.

Современные ЭБУ используют микропроцессор, который может обрабатывать входные данные от датчиков автомобиля в режиме реального времени. Наряду с аппаратным обеспечением, ЭБУ содержит код программ и данные, хранящиеся, как правило, в ПЗУ микроконтроллера. Это обеспечивает возможность перепрограммирования микропроцессора, загружая обновления или изменяя программу микроконтроллера.

Основным назначением ЭБУ автомобиля является регулировка топливовоздушного отношения и угла опережения зажигания для того, чтобы во всех режимах работы достигнуть требуемого крутящего момента и выходной мощности; важным также является уровень электромагнитных помех, при

превышении которого транспортное средство не может быть допущено к эксплуатации [54, 74].

Однако функциональные возможности современных ЭБУ не включают непосредственную регулировку уровня электромагнитных помех - для этой цели может использоваться регулировка времени накопления заряда в первичной обмотке катушки зажигания. Причем данное регулирование осуществляет гибкое управление процессами заряда и разряда в системе зажигания с точки зрения ЭМС автомобильного электрооборудования.

Электронный блок управления представляет собой совокупность электронных компонентов и взаимодействует с рядом электромеханических узлов и механизмов, представленных на рисунке 1.8.

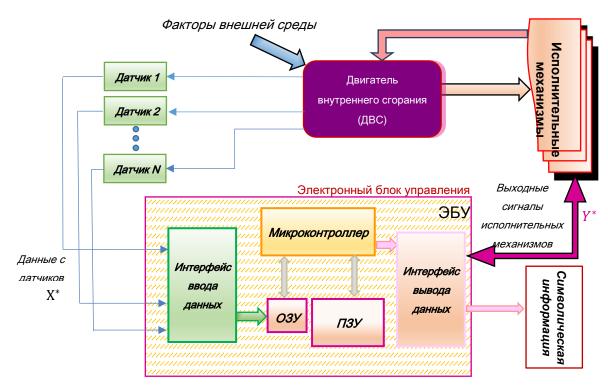


Рисунок 1.8 - Электронный блок управления ДВС во взаимодействии с другими устройствами

Причем оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) выполняет функцию отслеживания состояния ДВС (температура двигателя, нагрузка, скорость и т.д.) в то время как постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) предназначено для хранения программ управления различными режимами

работы ДВС и характеристических карт, подобным тем, которые изображены на рисунках 1.4-1.7.

На интерфейс ввода данных ЭБУ поступают аналоговые сигналы с датчиков, которые сначала преобразуются в цифровые, после этого данная информация сначала поступает ΟЗУ. измерительная затем микроконтроллер. После обработки и анализа измерительной информации микроконтроллером на основе программ и данных, хранящихся в ПЗУ, микроконтроллер посылает сигналы на интерфейс вывода данных, преобразующий цифровые сигналы в аналоговые, после чего сигналы идут на исполнительные устройства – в частности, в систему зажигания.

Таким образом, на основе входных данных, поступающих с датчиков, ЭБУ генерирует выходные электрические сигналы, осуществляющие управление режимом работы ДВС и его подсистем. На рисунке 1.9 [112] иллюстрируется процесс регулировки двигателя с помощью ЭБУ, направленный на управление системой зажигания.

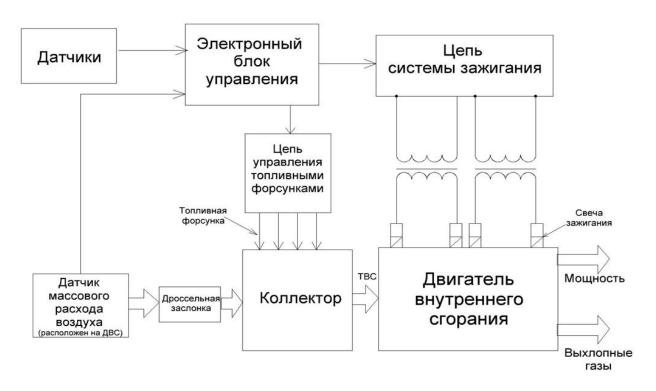


Рисунок 1.9 - Функциональная схема управления системой зажигания ДВС

Систему зажигания можно рассматривать как исполнительный механизм управления двигателем, который состоит из свечи зажигания, катушки

зажигания и цепи управления двигателя. Подобно другим исполнительным механизмам, система зажигания получает электрический сигнал от электронного блока управления для своевременного зажигания топливовоздушной смеси от электрической искры в конце такта сжатия. Электрическая искра приводит к возникновению ЭМП, а её мощность напрямую зависит от тока накопления, который, в основном определяет электромагнитную совместимость систем зажигания [61].

1.6 Влияние тока накопления на электромагнитную совместимость систем зажигания

Одним из основных факторов, определяющих электромагнитную совместимость системы зажигания, является в частности ток накопления $I_{\rm H}$, так как чем больше его значение, тем выше уровень электромагнитных помех.

На рабочем участке ток накопления зависит от времени накопления практически линейно, но управление этим током определяется множеством факторов такими, например, как напряжение аккумуляторной батареи, характеристиками катушки зажигания И так далее. Данные факторы ограничивают эффективность микроконтроллера в снижении уровня ЭМП посредством уменьшения времени накопления заряда, ЧТО приводит к уменьшению тока накопления $I_{\rm H}$.

По этой причине для более гибкого управления током накопления требуются новые интеллектуально-алгоритмические подходы, реализуемые на базе электронного блока управления и способные наиболее плавно управлять как током накопления, так и другими управляющими воздействиями.

Под управлением током накопления подразумевается чаще всего уменьшение его значения, что приводит к уменьшению энергии разряда между электродами свечи зажигания и, соответственно, к снижению уровня электромагнитных помех от системы зажигания.

В период времени разряда на свече в высоковольтной цепи СЗ протекает

ток i_p , который и генерирует основные электромагнитные помехи от данной системы. Эти помехи вводят кондуктивную составляющую тока $i_{p\kappa}$ помехи в бортовую сеть, которая передается в первичную обмотку катушки зажигания по емкостной межобмоточной связи.

В тоже время в низковольтной цепи системы зажигания протекает сигнал помехи в первичной обмотке i_{no} , создаваемый в период времени накопления энергии в катушке. В свою очередь ЭМП наводит ток в силовых и в сигнальных цепях бортовой сети. Таким образом, суммарное значение сигнала помехи, протекающей в низковольтном контуре СЗ, определяется как[6, 16, 50]:

$$i_{\sum} = i_{p\kappa} + i_{no} + i_{\partial M\Pi}, \tag{1.3}$$

где $i_{p\kappa}$ – разрядный ток, перенесенный из высоковольтной части системы зажигания в низковольтную;

 $i_{\text{по}}$ – ток первичной обмотки системы зажигания;

 $i_{\text{ЭМП}}$ – ток, наведенный ЭМП в низковольтной части системы зажигания.

Ток в низковольтной цепи зависит не только от параметров системы зажигания, но и от параметров приведенных нагрузок бортовых систем. Соответственно напряжение помех и U_{Π} в месте подключения системы зажигания к положительному потенциалу бортовой сети определяется по следующей формуле [6, 16, 50]:

$$U_{\Pi} = (i_{p\kappa} + i_{no} + i_{\partial M\Pi}) Z_{np}, \tag{1.4}$$

где Z_{np} — приведенное к входу низковольтного контура полное сопротивление бортовой сети.

В общем случае импеданс является комплексной величиной и зависит от комплектации конкретного автотранспортного средства.

Распространение помех происходит и в сигнальных цепях бортовых устройств - параметры помех зависят от фильтрующих свойств каждого конкретно взятого устройства [46, 50] и выражаются как:

$$i_{\sum_{i,j}} = i_{\kappa_{i,j}} + i_{u_{i,j}} + i_{\Im M\Pi_{i,j}},$$
 (1.5)

где $i_{\kappa_{i,j}}$ - кондуктивная составляющая помехи, созданная в $j^{\underline{o}\underline{u}}$ сигнальном проводнике $i^{\underline{z}\underline{o}}$ бортового устройства вследствие наличия гальванических связей с цепями питания;

 $i_{u_{i,j}}$ - кондуктивная составляющая помехи, созданная в $j^{o\check{u}}$ сигнальном проводнике i^{2o} бортового устройства вследствие наличия индуктивных связей с цепями питания;

 $i_{\Im M\Pi_{i,j}}^{'}$ - кондуктивная составляющая помехи, созданная в $j^{\underline{o}\underline{u}}$ сигнальном проводнике $i^{\underline{z}\underline{o}}$ бортового устройства вследствие наличия индуктивных связей с высоковольтной цепью системы зажигания. [50]

В бортовой сети автомобиля, одними из сильнейших, являются помехи, созданные системой зажигания и представляющие собой сумму сигналов, генерируемых в периоды времени протекания переходных, а также разрядных процессов в первичной обмотке катушки зажигания и в высоковольтном контуре соответственно.

Каждая составляющая суммарной кондуктивной помехи, распространяющаяся по проводам в бортовой сети, воздействует на электронные устройства в соответствующем частотном диапазоне. Поэтому необходимы практические меры по уменьшению электромагнитных помех от систем зажигания [35], в разработке которых могут помочь эмпирические исследования.

1.7 Эмпирические данные по электромагнитным помехам от системы зажигания автомобилей

Процесс проектирования и создания новых автомобилей сопряжен, в том числе и с корректированием уровня ЭМП от системы зажигания, поэтому на данном этапе необходимо проводить сертификационные и омологационные испытания. После испытаний на этапе постановки в серию новая модель должна полностью соответствовать действующим требованиям ЭМС [32].

Однако при продолжительной эксплуатации автомобилей, излучаемые помехи от СЗ значительно изменяются, что обусловлено процессами старения различных конструкций и элементов, влияющих на параметры ЭМП [33]. При этом ситуация усложняется тем, что возможность измерить уровень помех на станциях технического обслуживания (СТО) зачастую отсутствует. Провести подобные измерения могут только специализированные по данному профилю организации, число которых ограничено из-за стоимости оборудования и недостатка специалистов, способных производить грамотную диагностику уровня ЭМП. Описанный в разделе 1.3 метод диагностики этого уровня при помощи УФУС позволяет осуществлять лишь поверхностную проверку наличия ЭМП и не способен прогнозировать изменение значения и характера помех со временем.

Источниками высокочастотных помех помимо системы зажигания являются автомобильные телевизионные и радиоприемники, стартер, научное и медицинское оборудование, в случае его наличия на автомобиле, а также высокочастотные схемы (микропроцессоры, микроконтроллеры и другие высокоскоростные цифровые устройства) [30, 53].

На рисунке 1.10 [50] показаны экспериментальные данные по напряжению широкополосных радиопомех в бортовой сети автомобилей ВАЗ-2170 для разных пробегов (1000 км, 50000 км, 120000 км). Эксперимент проводился для диапазона частот от 0.1 до 1000 МГц, в котором основным является промежуточный диапазон частот от 0.15 до 110 МГц, где измеряется уровень

радиопомех от электрооборудования автомобиля согласно ГОСТ 28279-89.

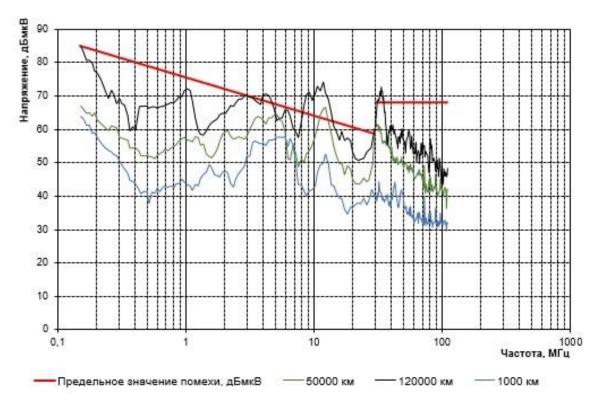


Рисунок 1.10 - Напряжение широкополосных радиопомех в бортовой сети автомобиля BA3-2170

Ha рисунке 1.11 [50] показаны экспериментальные данные ПО напряженности поля индустриальных широкополосных радиопомех OT автомобиля ВАЗ-2170 для разных пробегов (1000 км, 50000 км, 120000 км). Эксперимент проводился в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц, в котором также измеряется уровень радиопомех от электрооборудования автомобиля согласно ГОСТ 28279-89 и ГОСТ 51320-99.

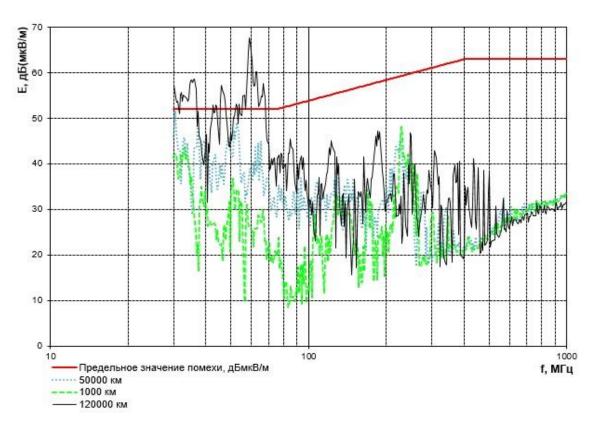


Рисунок 1.11 - Напряженность поля индустриальных широкополосных радиопомех от автомобиля BA3-2170

Из частотных характеристик, показанных на рисунке 1.11, видно, что СЗ автомобилей, имеющих пробег 120000 км в частотном диапазоне от 30 до 70 МГц несовместимы по параметрам ЭМС с другим электрооборудованием автомобиля и устройств вне его (аналогичные данные и для рисунка 1.10 в частотных диапазонах от 8 до 15 МГц и от 20 до 25 МГц). Источниками этого вида ЭМП могут быть непрерывно работающие электрические излучатели (например, системы зажигания или мобильная связь).

Электромагнитные помехи генерируются и при переходных процессах, когда источник излучает короткие импульсы вместо непрерывного сигнала. Переходные процессы возникают при коммутациях в различных электрических цепях - примерами таких цепей являются системы зажигания, электромагниты, электромоторы и подобное электрооборудование.

Важным фактором работы системы зажигания является и то, что генерируемые ей ЭМП оказывают влияние на биологические организмы. При исследовании воздействия ЭМП от системы зажигания на биологические

организмы необходимо учитывать, что на временном интервале измерений на организм оказывают влияние множество факторов (стрессы, заболевания, травмы, воздействие естественной и искусственной радиации и так далее), которые могут дополнять последствия облучения ЭМП. По этой причине эффект воздействия ЭМП чрезвычайно сложно выделить в чистом виде, из чего следует, что полную статистику по результатам взаимодействия излучения автомобильных систем зажигания с биологическими организмами не удастся получить в ближайшем будущем из-за очень большого объема статистических данных и сложности контрольного эксперимента.

Для обеспечения электромагнитной безопасности радиотехнических средств (РТС) и биологических организмов надо, прежде всего, уменьшать уровень помех, создаваемых СЗ автомобиля. В то же время, для достижения оптимальных результатов необходимо стараться комплексно подходить к проблеме ЭМС, потому что необоснованные меры по подавлению ЭМП приводят к ухудшению характеристик работы и качества автомобиля. По этой причине требуется детальное исследование зависимости параметров ЭМП по уровню электрических и магнитных полей, создаваемых системой зажигания от различных влияющих факторов [17, 19].

Для косвенного изучения влияния электромагнитных помех от системы зажигания на биологические организмы, при использовании норм санитарных правил и норм (СанПИН), проводился эксперимент, в котором измерялся уровень электрических и магнитных полей при работе системы зажигания. В ходе эксперимента было рассмотрено влияние низкочастотной составляющей электромагнитного поля катушки зажигания как на работу электрооборудования автомобиля и внешних устройств, так и на биологические организмы [62, 64].

В ходе исследования данного косвенного воздействия на биологические организмы использовался прибор для измерения параметров электрического и магнитного полей В/Е-МЕТР-АТ002 МГФК 411173.004. Испытания проводились на автомобилях ВАЗ 11176 и ВАЗ 2170, причем вышеуказанный прибор работал в двух низкочастотных диапазонах: от 0.005до 2кГц и от до 400

кГц.

Методика проведения измерений интенсивности электрического и магнитного полей низкой частоты от системы зажигания. В данных экспериментальных исследованиях использовалась система зажигания с катушкой типа 21120.3705010. Сами эксперименты заключались в снятии значений напряженности электрического поля $E_{\rm Hy}$ и магнитной индукции $B_{\rm Hy}$ в низкочастотном диапазоне во время работы двигателя автомобиля ВАЗ 2170 на разных скоростных режимах (600, 1000, 2000, 4000 об/мин). Измерения проводились при следующих условиях:

- при номинальном токе I_n в первичной обмотке катушки зажигания;
- в режиме холостого хода, при пониженных токах $(I = (I_n/3))$, когда снят высоковольтный ввод катушки зажигания;
- для фоновых значений (при отключенном стенде).

Значения снимаются в девяти точках (по три на каждой координатной оси), которые расположены на расстояниях 0.5, 1 и 1.5м от катушки зажигания. Для получения итоговой напряженности электрического поля $E_{\rm H_{}^{4}}$ и магнитной индукции $B_{\rm H_{}^{4}}$ производится суммирование значений в точках, расположенных на каждой из взаимно перпендикулярных осей.

Результаты измерений представлены в форме таблиц и графиков, анализ которых позволяет сделать вывод об источнике помех в данной системе. После этого, в зависимости от того, что является источником помех в системе, вырабатывается комплекс мер по ликвидации или максимальному ослаблению наведённых помех.

Экспериментальные результаты низкочастотных ЭМП от катушки зажигания. В Таблице 1.1, приводятся экспериментальные данные, полученные для точек, расположенных на расстоянии S = 0.5 м от катушки. (Характер данных, полученных для других точек, аналогичен).

Таблица 1.1 - Экспериментальные данные при номинальном токе через первичную обмотку катушки зажигания (пробег 50000 км)

| Параметры | Скорость вращения, | Ось | X | Y | Z | Общее |
|---------------------------------------|--------------------|--------------|------|------|------|--------|
| | об/мин | | | | | |
| <i>E</i> _{нч} , B /м | 600 | X | 127 | 50 | 82 | 159.3 |
| | | Y | 67 | 42 | 112 | 137.1 |
| | | Z | 27 | 65 | 90 | 114.25 |
| | 1000 | X | 115 | 67 | 30 | 136.43 |
| | | Y | 100 | 67 | 62 | 135.4 |
| | | Z | 25 | 75 | 95 | 123.6 |
| | 2000 | X | 107 | 37 | 52 | 124.6 |
| | | Y | 77 | 110 | 85 | 158.9 |
| | | \mathbf{Z} | 17 | 87 | 55 | 104.3 |
| | 4000 | X | 110 | 37 | 52 | 127.2 |
| | | Y | 20 | 55 | 22 | 62.52 |
| | | \mathbf{Z} | 30 | 87 | 75 | 118.7 |
| | | | | | | |
| <i>В</i> _{нч} , мкТ л | 600 | X | 0.32 | 0.5 | 0.35 | 0.69 |
| | | Y | 0.57 | 0.6 | 0.32 | 0.887 |
| | | Z | 0.25 | 0.22 | 0.25 | 0.416 |
| | 1000 | X | 0.3 | 0.47 | 0.27 | 0.62 |
| | | Y | 0.32 | 0.75 | 0.35 | 0.82 |
| | | Z | 0.25 | 0.27 | 0.22 | 0.43 |
| | 2000 | X | 0.35 | 0.32 | 0.27 | 0.54 |
| | | Y | 0.35 | 0.4 | 0.4 | 0.665 |
| | | Z | 0.2 | 0.3 | 0.25 | 0.44 |
| | 4000 | X | 0.55 | 0.4 | 0.95 | 1.144 |
| | | Y | 0.4 | 0.32 | 0.47 | 0.7 |
| | | Z | 0.17 | 0.35 | 0.42 | 0.573 |

^{*}Красным цветом помечены величины, которые превышают допустимый уровень электромагнитных помех.

Фоновые значения $E_{\rm HY}$ и $B_{\rm HY}$ при отключенном стенде сведены в нижеследующую Таблицу 1.2.

Таблица 1.2 - Фоновые значения напряженности электрического поля и магнитной индукции

| Параметры | Расстояние(м) | Ось | Ось | | | Общее |
|-------------------------|---------------|-----|--------|--------|--------|------------|
| | | | X | Y | Z | |
| $E_{\rm HY}/B_{\rm HY}$ | 0.5 | X | 2/0.07 | 2/0.1 | 2/0.07 | 3.46/0.141 |
| | | Y | 5/0.1 | 5/0.12 | 2/0.1 | 7.35/0.185 |
| | | Z | 7/0.07 | 5/0.1 | 5/0.1 | 9.95/0.158 |
| | 1 | X | 2/0.05 | 2/0.1 | 2.0.07 | 3.46/0.132 |
| | | Y | 5/0.12 | 7/0.07 | 5/0.1 | 9.95/0.171 |
| | | Z | 7/0.12 | 5/0.07 | 5/0.1 | 9.95/0.171 |
| | 1.5 | X | 2/0.1 | 2/0.1 | 2/0.07 | 3.46/0.158 |
| | | Y | 5/0.1 | 5/0.12 | 2/0.1 | 7.35/0.185 |
| | | Z | 7/0.12 | 5/0.1 | 5/0.1 | 9.95/0.185 |

При пониженных токах $I = (I_n/3)$, когда снят высоковольтный ввод, также проводились измерения параметров электрического и магнитного полей, указанные в Таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Эксперимент с высоковольтным вводом

| Параметры | Высоко- вольтный ввод | Расстояние (S, м) | | | | |
|---|-----------------------------|-------------------|--------|---------|------------|--|
| | | X | Y | Z | Общее | |
| $E_{\scriptscriptstyle \mathrm{HY}}/B_{\scriptscriptstyle \mathrm{HY}}$ | Есть | 12/0.45 | 20/0.3 | 10/0.47 | 25.37/0.72 | |
| | Снят | 10/0.5 | 5/0.17 | 7/0.42 | 13.2/0.675 | |

Нижеследующие графики представляют параметры электромагнитного поля, измеренные на автомобиле BA3 2170, как функции расстояния от катушки зажигания.

Опыт производился для трех случаев:

- 1. Автомобиль на гарантии (пробег 1000 км);
- 2. Автомобиль с пробегом 50 тыс. км;
- 3. Автомобиль при выключенном зажигании (фоновые значения).

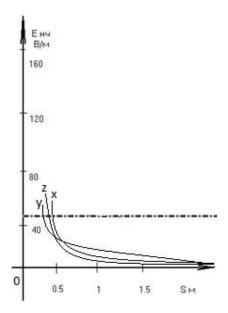


Рисунок 1.12 - Зависимость $E_{\rm HY}(S)$ — рабочая характеристика при 600 об/мин и пробеге 1000 км (автомобиль на гарантии)

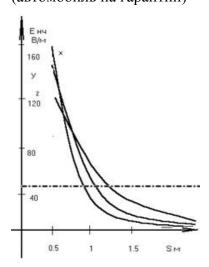


Рисунок 1.14- Зависимость $E_{\text{нч}}(S)$ — рабочая характеристика при 600 об/мин и пробеге 50 тыс. км

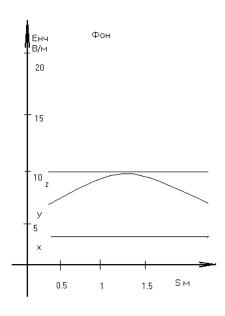


Рисунок 1.13- Зависимость $E_{\text{нч}}(S)$ — фоновые значения

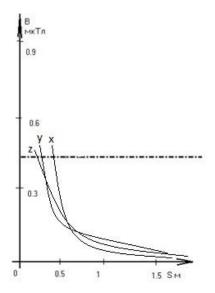


Рисунок 1.15- Зависимость $B_{\rm H ext{ iny H}}(S)$ — рабочая характеристика при 600 об/мини пробеге 1000 км (автомобиль на гарантии)

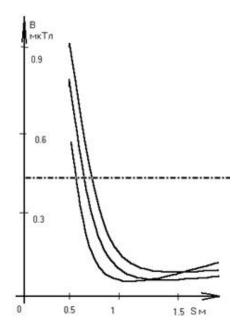


Рисунок 1.16- Зависимость $B_{\rm HY}(S)$ — рабочая характеристика при 600 об/мини пробеге 50 тыс. км.

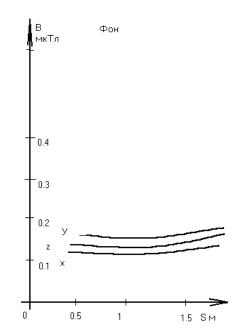


Рисунок 1.17- Зависимость $B_{H^{\mathbf{q}}}(S)$ — фоновые значения

Согласно правилу №10 ЕЭК ООН, а также СанПИН и ГОСТу 12.1.006 - 84, уровень помех по напряженности электрического поля для рабочих мест (то есть данные правила распространяются как на водителя, так и на пассажиров автомобиля, которые проводят в автомобиле достаточно длительное время) не должен превышать 15 - 80 (В/м), в зависимости от частотного диапазона ЭМП и до 0.46 (мкТл) для индукции магнитного поля.

На основании этих правил и вышеприведенных табличных данных можно сделать вывод, что исследуемая катушка зажигания (при пробеге 50 тыс. км) согласно правилу №10 ЕЭК ООН и СанПИН может быть опасной по требованиям электромагнитной совместимости для биологических организмов. Таким образом, для уменьшения влияния помех необходимо либо применять экранированную катушку зажигания, либо каким-то другим способом снижать негативный эффект наводимых данной катушкой ЭМП, оказываемый на биологические организмы. Для того чтобы защитить человека необходимо исследовать и проанализировать более универсальные и доступные методы диагностики, способные осуществлять мониторинг электромагнитных помех в режиме реального времени.

Развитие виртуальных приборов И инструментов диагностики обусловлено несколькими факторами, наиболее важными из которых являются широкое распространение микропроцессорных устройств, появление соответствующих платформ программирования, а также развитие сетевых технологий. В совокупности, данные факторы позволяют строить на основе индивидуальных виртуальных приборов комплексные системы, обладающие возможностями интеллектуальной обработки измерительных данных, так называемые интеллектуально-информационные системы (ИИС).

В следующем разделе будут описаны принципы построения интеллектуальных виртуальных инструментов, основанных на компьютерных алгоритмах, а также примеры применения этих приборов для диагностики неисправностей различных систем автомобиля. В последующих главах диссертации будет показано, как подобные инструменты автомобильной диагностики могут быть интегрированы в единый диагностический комплекс, осуществляющий интеллектуальную обработку измерительной информации.

1.8 Использование систем искусственного интеллекта для обеспечения требований по электромагнитной совместимости

Усложнение электронного оснащения автомобилей, а также процессы интеграции управления за взаимодействующими автомобильными системами (такими, например, как системы зажигания, системы подачи топлива и системы рециркуляции выхлопных газов) в единый комплекс, требует усовершенствования управления ДВС. Кроме того, такое усложнение приводит к возникновению дополнительных проблем в идентификации неисправностей, связанных с работой индивидуальных систем (в частности – системы зажигания), особенно при наличии сложных процессов взаимодействия между вышеуказанными подсистемами.

Наиболее эффективно эти проблемы могут быть решены с помощью осуществления непрерывного мониторинга, протекающих в этих системах

процессов, с целью обнаружения на ранних стадиях различных дефектов и неисправностей, частичного или полного устранения этих неисправностей, а также, по возможности, оценки влияния выявленных дефектов на дальнейшую работу системы [37, 61, 70, 74].

Подобные диагностические комплексы мониторинга и раннего оповещения о неисправностях позволяют уменьшить время и сложность ремонта автомобиля, улучшить управление ресурсами автомобиля в зависимости от степени их износа, что в конечном итоге отражается на стоимости эксплуатационных затрат.

Развитие современной измерительной техники, телекоммуникационных и компьютерных технологий, а также усовершенствование аппаратных и программных интерфейсов водителя, создают широкую базу для разработки универсальных систем автомобильной диагностики, мониторинга и контроля. Наличие измерительных данных, собранных как во время нормальной работы автомобильных систем, так и в условиях присутствия неисправностей, в совокупности с интеллектуальными методами диагностики, позволяет осуществлять более детальную диагностику, способствующую не только фиксированию несоответствия измеряемых данных номинальным, но и выявлению наиболее вероятных причин возникновения неисправностей.

Интеллектуальная идентификация и классификация неисправностей, реализуемая в режиме реального времени либо с помощью диагностических кодов неисправностей (ДКН), либо в результате работы, встроенных в ЭБУ программ, способна уменьшить уровень неопределённости при диагностике неисправностей, в частности обусловленных внештатным взаимодействием автомобильных систем. Диагностический сканнер с использованием компьютерного интеллекта, например, характеризуется способностью (а) к обучению, базирующейся на интерпретации измеряемых данных, (б) к выбору и реализации тестовых процедур, наиболее соответствующих текущему состоянию диагностируемой системы, а также (в) к адаптивной настройке динамических параметров управления [72, 79].

Первым этапом построения интеллектуального диагностического комплекса, определяющего электромагнитную совместимость автомобильных систем, в частности системы зажигания, является выбор методики выявления неисправностей - основные методики приведены ниже.

Методологические подходы к диагностике неисправностей. Традиционно в автомобильной промышленности широкое применение обработки численные методы данных для находили моделирования происходящих процессов, проектирования прототипов различных систем автомобиля, а также для диагностики и прогнозирования эксплуатационных неполадок [28, 66, 69]. Использование численных методов на практике для обнаружения и диагностики неисправностей привело к выявлению следующих подходов к проведению диагностических операций:

- подход, основанный на *математическом моделировании* (MM) диагностируемой системы;
- подход, базирующийся на диагностических данных (ДД);
- подход, использующий *накопленные знания* (НЗ) о типичных неисправностях и результатах их влияния на работу диагностируемой системы.

Для эффективной диагностики с использованием математического моделирования (ММ) требуется априорное знание физических процессов, лежащих в основе работы диагностируемой системы, наличие точных математических моделей, описывающих эти процессы, а также доступность необходимого числа физических датчиков как для мониторинга состояния системы, подлежащей диагностике, так и для динамической настройки математических моделей [94]. Вышеуказанные параметров условия MM ограничивают применимость подхода только ДЛЯ систем, характеризующихся малым числом возможных состояний и небольшим количеством входных и выходных данных. Использование подхода ММ в электромагнитной совместимости системы чистом виде для анализа сложностью расчёта электромагнитного зажигания затруднено поля,

генерируемого компонентами системы зажигания в непосредственной близости стенок ДВС и корпуса автомобиля [4, 35].

базирующийся Подход, на диагностических данных (ДД), предпочтителен в ситуациях, когда получение точной математической модели тестируемой системы либо нереально из-за её сложности, либо недопустимо в силу мер по защите интеллектуальной собственности. В таких случаях, эмпирические данные, полученные при диагностике системы, работающей как в нормальных условиях, так и при наличии неисправностей, являются диагностической информации. основным источником Примерами использования ДД подхода служит применение статистических методов анализа данных, измеренных в процессе различных режимов работы диагностируемой системы, а также алгоритмов компьютерного интеллекта (искусственные нейронные сети, классификационный метод опорных векторов, генетические алгоритмы и алгоритмы с использованием нечеткой [2]. логики) Диагностические возможности интеллектуальноинформационных систем, основанных на таких алгоритмах, достаточно многообразны и ограничены только минимальным объёмом доступных диагностических данных [113]. Глава 3 данной диссертационной работы будет нацелена на освещение применения вышеуказанных алгоритмов к выявлению и идентификации проблем с ЭМС системы зажигания автомобиля.

Подход к диагностике неисправностей, использующий накопленные знания (НЗ), применим к комплексным системам с установленными причинно-следственными отношениями, что делает возможным применение экспертных систем, основанных на результатах эмпирического анализа. В отличие от ММ подхода, накопленные знания зачастую формулируются в виде графических моделей (сети Петри, сети Байеса, многосигнальные поточные графики) [62, 64], что позволяет повышать уровень абстракции при проведении диагностики, выражающийся в способности диагностического комплекса определять сразу несколько возможных причин той или иной неисправности

и присваивать им соответствующие вероятностные значения. Являясь потенциально интересным и многообещающим, НЗ подход к диагностике неисправностей, связанных с ЭМС, пока не нашёл широкого применения, возможно из-за недостаточной изученности причинно-следственных отношений в сфере электромагнитной совместимости узлов и систем автомобиля [41, 42].

Современные бортовые диагностические (БДС) системы ΜΟΓΥΤ одновременно реализовывать вышеуказанные подходы к диагностике неисправностей за счёт возможности использования программных средств мониторинга, контроля и управления. Подобные средства вычислительной именуемые интеллектуальными датчиками (ИД), универсальностью в силу их способности изменять программное обеспечение, что позволяет управлять процессом их работы и функциональными возможностями [89] – их применению на практике посвящён последний раздел данной главы.

1.9 Виртуализация диагностических процессов посредством интеллектуальных датчиков

Усложнение процесса анализа электромагнитной совместимости системы зажигания ДВС приводит к росту числа и диапазонов измеряемых величин, повышению требований к точности измерений и их быстродействию. Это влечет за собой необходимость автоматизации измерений и разработку принципиально новых подходов к сбору и анализу данных, отражающих и характеризующих ЭМС [38, 39, 40, 77].

В основе таких подходов используются средства вычислительной техники, осуществляющие сбор, хранение и обработку большого количества измерительных данных с целью получения достоверной диагностической информации.

Внедрение и использование виртуальных датчиков и диагностических устройств основано на переработке измерительной данных с помощью средств вычислительной техники, что приводит К приобретению данными диагностическими устройствами новых функциональных возможностей по обработке информации. Эти обеспечиваются возможности интеллектуальными датчиками (ИД), входящими в состав ИИС. В частности, ИД может повышать точность измерений благодаря применению числовых вычислений для компенсации нелинейности чувствительного элемента или его температурной зависимости [78]. Такой датчик способен работать с большим количеством чувствительных элементов, а также комбинировать измерительные каналы. Кроме того, ИД могут производить настройку на другие диапазоны измерений и осуществлять внутреннюю самодиагностику, что упрощает их техническое обслуживание [89].

Таким образом, ИД можно называть измерительное устройство, которое благодаря своим вычислительным возможностям обеспечивает более высокую достоверность измерений. Повышение достоверности оценки измеряемой величины достигается при интеграции ИД в ИИС с помощью реализации эффективных алгоритмов анализа и интерпретации измеряемых данных [72].

Основным отличием ИД от обычного является наличие схемы или алгоритма обработки измеряемого сигнала. Устройство ИД позволяет проводить автономную реализацию основных метрологических функций, таких как калибровку чувствительного элемента, линеаризацию выходного сигнала, компенсацию мультипликативной и устранение аддитивной погрешностей, аналогово-цифровое преобразование, и тому подобное[89].

Классификация ИД производится либо по их функциональным возможностям (интегрированные, дедуктивные, самонастраивающиеся, само диагностируемые), либо по используемой методике обработки данных (ориентированные на математическое моделирование, на компьютерную обработку эмпирических данных, на накопленные знания и экспертные

оценки, гибридные и т.п.) [62]. Как было отмечено выше, в данной работе основной упор будет сделан на разработку компьютерных ИД, осуществляющих интеллектуальную обработку измеряемых данных с целью выявления и классификации неисправностей, влияющих на электромагнитную совместимость систем автомобиля.

Использование подобных методик и устройств в бортовой системе диагностики предназначено для [78]:

- выявления неисправностей узлов, механизмов и эксплуатационных характеристик диагностируемой системы;
- возможности продолжать работу в условиях наличия или возникновения таких неисправностей;
- предоставления более полной диагностической информации с целью локализации неисправности и/или нейтрализации её действия.

В данной работе рассмотрена задача реализации первой и последней целей методик построения ИД, с целью оснащения ЭБУ способностью своевременно определять проблемы с ЭМС, вызванные работой системы зажигания ДВС, и идентифицировать или локализовать наиболее вероятные причины возникновения этих проблем. Для решения этой задачи будут задействованы алгоритмические методы вычислительного интеллекта, описанные ниже, которые составляют программный арсенал ИД.

Как было замечено Л.А. Заде – основателем «теории нечетких систем и мягких вычислений»— с ростом сложности систем человеческая способность их характеризовать падает [25]. В то же время, традиционные компьютерные вычисления требуют наличия полной и точной информации об анализируемой системе для того, чтобы предоставить практически значимые результаты.

Возникший диссонанс между особенностями реальных систем и возможностями вычислительной техники устраняется с помощью, так называемого вычислительного интеллекта — сложной компьютерной методологии, состоящей из следующих компонентов [78]:

- *искусственные нейронные сети* (ИНС), позволяющие ИД обучаться, адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования, а также осуществлять системное моделирование и идентификацию;
- вычислительные классификаторы, в частности *метод опорных векторов* (МОВ), использующиеся для решения задач классификации и регрессионного анализа;
- *вероятностные вычисления* (BB), предназначенные в основном для систематизированного синтеза ИД и оптимизации их параметров;
- системы нечеткой логики (СНЛ), осуществляющие приближенные вычисления, аппроксимацию и категоризацию.

Следует также отметить, что вышеперечисленные составные части вычислительного интеллекта не конкурируют между собой, а демонстрируют эффект взаимного усиления достоинств и нивелирования недостатков отдельных методов, что может быть использовано при построении интеллектуально-информационных систем, интегрирующих несколько ИД в единый диагностический комплекс (смотри главу 4).

Это свойство вычислительного интеллекта позволяет проводить интеллектуальный анализ данных по двум направлениям. С одной стороны, можно проводить исследовательский подтвердительный анализ (в частности, процесс выявления неисправностей). С другой стороны, можно сосредоточить усилия на описательно-логическом анализе, который ставит своей целью либо анализ статистических данных о каком-либо процессе (например, для определения наиболее вероятных причин возникновения неисправностей), либо показ тенденции изменения этого процесса (прогнозирование эксплуатационного режима) [42].

В зависимости от проводимого анализа интеллектуально-информационные системы используют нижеперечисленные алгоритмические подходы:

Искусственные нейронные сети (ИНС). Искусственные нейронные сети нашли широкое распространение в интеллектуальных системах из-за

своих способностей моделировать сложные динамические процессы, которые проблематично описать с помощью математических моделей. Обобщённая функциональная схема интеграции базирующегося на ИНС ИД в интеллектуально-информационную систему, предназначенную для моделирования, анализа и контроля исследуемого процесса или объекта управления, изображена на рисунке 1.18 [42, 64, 112].

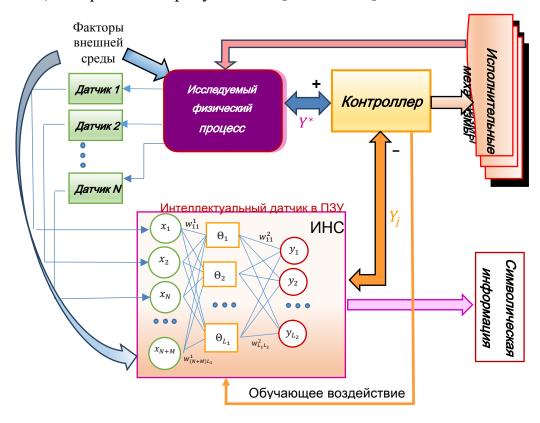


Рисунок 1.18 -Функционирование ИНС при построении интеллектуальных датчиков

Как видно из рисунка, на вход ИНС поступают те же входные воздействия $x_i, i \subset \overline{1, N+M}$ (1.6), что и на исследуемый объект моделирования. С выхода ИНС снимаются значения $y_j, j \subset \overline{1,L}$, которые затем сравниваются контроллером с выходными параметрами исследуемого объекта/процесса — при существенном различии в значениях сравниваемых величин, ИНС "настраивается" с помощью изменения весовых коэффициентов $w_{ij}^k, (i \subset \overline{1,N+M}, j \subset \overline{1,L}, k \subset \overline{1,S})$ (1.7) до момента, когда разница при превышении уровня ЭМП снизится до требуемого порогового значения.

Подобное функционирование ИНС подразумевает использование многослойной (S слоёв, включая входной и выходной слои) топологии связей между нейронами и алгоритма обучения с "учителем" (в силу предоставления целевых значений \overline{Y} выходных параметров) при обратном распространении ошибки.

В качестве активационной функции нейронов ИНС, как правило, используется сигмоидальная активационная функция, в частности для нейронов первого скрытого слоя, показанных на рисунке 1.19— логистическая:

$$O_{j} = \frac{1}{1 + \exp(-net_{j})}, j \subset \overline{1, K}, \qquad (1.8)$$

$$net_{j} = \sum_{i=1}^{N+M} w_{ij}^{1} \cdot x_{ij} + b_{j}, \qquad (1.9)$$

где net_j — параметр наклона сигмоидальной функции. Изменяя этот параметр посредством настройки весовых коэффициентов ИНС, можно построить функции с различной крутизной и порогом активизации, что в конечном итоге приводит к уменьшению разницы между моделируемыми Y_k , $k \subset \overline{1,L}$ и реальными $\overline{Y^*}$ выходными параметрами исследуемого процесса, обычно оцениваемой среднеквадратической функцией ошибки[23]:

$$E = \frac{1}{2L} \sum_{k=1}^{L} (\widehat{Y}_k - \overline{Y}_k^*)$$
 (1.10)

Сигмоидальная функция активизации нормирует диапазон изменения выходного сигнала нейронов в интервале [0,1].

Эмулирование измерительного процесса осуществляется так называемыми виртуальными датчиками, известным примером которых в автомобилях может служить датчик измерения температуры воздуха [52, 62].

Погрешность измерения виртуального датчика зависит как от точности используемой модели и её параметров, так и от погрешности физических датчиков, предоставляющих измерительные данные для этой модели. Кроме

того, выбор физических датчиков для осуществления виртуальных измерений предельно важен, так как присутствие лишних, неточных или неполных измерительных данных затрудняет проектирование, построение и использование виртуальных датчиков, большинство из которых можно отнести к категории ИД и составляющих основу интеллектуальных информационных систем (ИИС).

Примером использования виртуальных датчиков, является определение различными электромагнитной совместимости между системами устройствами в автомобиле, включая систему зажигания, что является нетривиальной задачей. Построение схем замещения системы зажигания с целью выявления ЭМС влечёт за собой, в частности, необходимость оценки значительного количества паразитных параметров свечи зажигания [76-77], весьма затруднительно. Поэтому, представляется что практике целесообразным использовать преимущества виртуальных датчиков как для выявления проблем с ЭМС, так и для классификации этих проблем с целью определения наиболее вероятных причин неисправностей. Классификация также может проводиться с помощью ИД, работа которых рассмотрена в следующем подразделе.

Линейная классификация с использованием опорных векторов. В алгоритмах машинного обучения необходимость часто возникает классифицировать данные, представленные как точки p – мерном пространстве R^p . Каждая из этих точек принадлежит только одному их двух классов, и задача линейной классификации заключается в разделении данных гиперплоскостью с размерностью "p-1".

Таких гиперплоскостей может быть несколько. Поэтому повышение эффективности классификации влечёт максимизацию зазора между классами, или, другими словами, нахождение такой гиперплоскости, чтобы расстояние от нее до ближайшей точки, подлежащей классификации, было бы максимальным. Это бы в свою очередь максимизировало расстояние между

двумя ближайшими точками, лежащими по разные стороны гиперплоскости. Целью метода опорных векторов (МОВ) является нахождение такой гиперплоскости[61, 63].

Основная идея МОВ заключается: (а) в переводе исходных данных в пространство более высокой размерности, а затем (б) в поиске разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором в этом пространстве. Предполагается, что исходные данные имеют вид:

$$\{(x_1, c_1), (x_2, c_2), ..., (x_n, c_n)\},$$
 (1.11)

где $c_i = \pm 1$ в зависимости от того, какому классу принадлежит x_i . Каждый $x_i \in R^p$, $i \subset \overline{1,n}$, это p – мерный вещественный вектор, обычно с нормализованными координатами в интервалах [0,1] или [-1,1] [-1,1]. Если координаты не будут нормализованы, то вектор с большими отклонениями от средних значений координат может сильно повлиять на точность классификации [105].

Набор исходных данных (1.11) можно по аналогии с ИНС рассматривать как множество обучающих пар, задающих класс принадлежности для каждого элемента данных. Задача алгоритма метода опорных векторов заключается в идентичной классификации исходных данных и подобной классификации вновь поступающих. Для этого строится разделяющая гиперплоскость (т.е. классификационная модель для виртуального датчика), которая имеет вид:

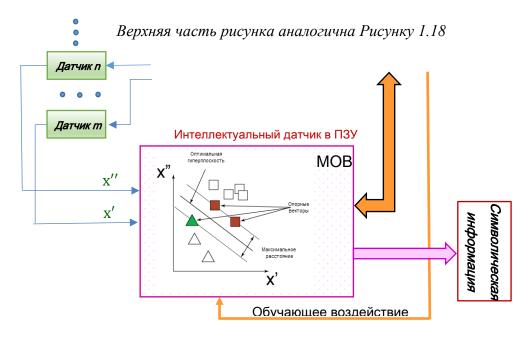


Рисунок 1.19- Применение МОВ для классификации диагностических данных

Информации о применении метода опорных векторов, а также и других методов вычислительного интеллекта, для определения уровня и причин возникновения электромагнитных помех от системы зажигания ДВС найдено не было, в силу чего этот аспект диссертационной работы представляет оригинальность и научную новизну, о чём более подробно будет описано в Главе 3.

Следует также отметить, что основная сложность построения классификационной модели МОВ заключается в том, что чем выше размерность векторного пространства данных, тем сложнее проводить классификацию. Один из способов работы с данными высокой размерности – это предварительное применение какого-либо метода понижения размерности данных для выявления наиболее существенных компонентов[23, 37]. В решении этой задачи могут помочь методы, рассмотренные в следующем подразделе.

Вероятностные и эволюционные вычисления. В интеллектуально - информационных системах (ИИС) вероятностные вычисления (ВВ) в основном применяются для обращения с неточно известными величинами,

которые изменяются как стохастические. Программные средства, обеспечивающие вероятностные вычисления в ИИС, упрощают сбор и анализ, что в некоторых случаях позволяет извлекать выводы о причинно-следственных зависимостях в исследуемых процессах и объектах [55].

В настоящее время ВВ в основном базируются на концепции регрессионной модели, примером которой может служить авторегрессионная зависимость со скользящим средним (АРСС) и внешними воздействиями, связывающая интересующую нас переменную с рядом факторов, потенциально на нее влияющих[89]:

$$y_{j}(t_{k}) = \sum_{i=1}^{n_{a}} \lambda_{i} y_{j}(t_{k-i}) + \sum_{i=1}^{n_{c}} \eta_{i} \varepsilon(t_{k-i}) + \sum_{m=1}^{n_{x}} \sum_{i=1}^{n_{b}} \chi_{im} x_{m}(t_{k-i}), j \subset \overline{1, L}, \quad (1.12)$$

где n_a , n_c и n_b , n_m - порядки авторегрессионного, скользящего среднего, и внешних системных компонентов соответственно; λ_i , η_i и χ_{im} - это искомые коэффициенты эмпирической модели BB.

Помимо ИИС вероятностных методов, также используют эволюционные вычисления (ЭВ), представляющие собой обобщающий термин, используемый для описания программных средств (методов) на основе вычислительных моделей эволюционных процессов. В основе этих процессов лежит подражание ЭВОЛЮЦИОННЫМ процессам отбора изменяющихся условиях окружающей электромагнитной обстановки [67, 78].

Другими словами, эволюционные вычисления (ЭВ) — это бионическое (то есть основанные на биологических принципах) направление, которое использует модели, существующие в природе, но существенно упрощенные для того, чтобы их можно было реализовать в вычислительных системах. На основе этих моделей строятся алгоритмы, которые позволяют реализовывать поисковые механизмы адаптации [2, 61].

Примерами алгоритмов ЭВ являются генетические алгоритмы, эволюционные стратегии и эволюционное программирование. К основным областям применения этих алгоритмов можно отнести задачи структурной,

функциональной и параметрической оптимизации, базирующиеся на поиске оптимального решения поставленной задачи. Из-за поисковой ориентированности алгоритмов этой категории их иногда называют стохастическими методами поиска [54, 70].

В то же время, так как предметом данного исследования являются электромагнитные помехи от системы зажигания ДВС автомобиля, которые характеризуются быстропротекающими процессами, что усложняет использование вероятностных и эволюционных вычислений самих по себе. Тем не менее, их гибридизация с другими программными средствами интеллектуальных систем, позволяет применять эти подходы в системах управления двигателем (СУД), осуществляющими управление нелинейными динамическими процессами, происходящими в ДВС. Для решения этой задачи могут использоваться системы нечеткой логики (СНЛ).

Системы нечёткой логики (СНЛ). Системы нечёткой логики представляют собой математические модели, позволяющие оперировать непрерывными аналоговыми сигналами в диапазоне их действия в отличие от обычной (цифровой) логики, использующей только дискретные величины 0 и 1.

К преимуществам нечеткой логики можно отнести способность СНЛ выражать найденные решения в терминах, которые понятны человеку, что упрощает использование и адаптацию ИИС, имеющие компоненты с нечёткой логикой [24, 25].

Функция принадлежности (ФП) используется для кластеризации значений входных сигналов x_i , $i \subset \overline{1,N+M}$, формируя при этом нечеткие множества, которые отображаются СНЛ на область выходных значений $\hat{Y}_{out} \subset R^L$ исследуемого процесса. Подобное отображение позволяет упростить обработку диагностической информации, поступающей в СУД, а также способствует более оперативному извещению пользователя ИИС о возникающих неисправностях в работе исследуемого объекта управления.

Для апробации диссертационной работы были, в частности, применены системы нечеткой логики для мониторинга текущего состояния и определения оптимального режима ремонтных работ активно-адаптивных электрических сетей [113].

В заключение данного раздела следует заметить, что расширение функциональных возможностей современных микропроцессоров (МП) в ЭБУ двигателя (увеличение числа ядер МП, их быстродействия, кэш памяти, разрядности шин), а также их эксплуатационной надёжности, позволяют усложнять и совершенствовать программное обеспечение, используемое для управления и диагностики работы систем зажигания автомобиля. Причем каждый автомобиль имеет индивидуальные особенности, учесть которые экспериментально очень сложно, поэтому в следующей главе будет представлено математическое моделирование дуговых процессов в СЗ с переходом на моделирование электромагнитных помех от СЗ, а также к интеллектуальной обработке этих данных с целью получения полезной информации и новых знаний.

1.10 Выводы по главе

- 1. Согласно трудам, отечественных и зарубежных ученых установлено, что электромагнитные помехи от системы зажигания оказывают негативное влияние на электрооборудование, находящееся внутри и вне автомобиля, что делает актуальным рассмотрение проблемы обеспечения ЭМС этих систем.
- 2. Проведенный анализ выявил, что уровень электромагнитных помех напрямую зависит от времени накопления заряда в первичной обмотке катушки зажигания, так как время накопления зависит от тока разрыва и существенно влияет на энергию разряда и возникающие от него электромагнитные помехи.

- 3. Было продемонстрировано и выяснено, что существующие методы подавления электромагнитных помех либо не позволяют эффективно бороться с превышением уровня помех, возникающим при работе системы зажигания, либо их использование оказывается проблематичным из-за стоимости или недоступности специализированного оборудования.
- 4. На основании предварительного обзора литературы было что виртуальные диагностические приборы расширяют выявлено, инструментарий эффективной борьбы с превышением уровня помех в силу интеллектуальных возможностей, позволяющих обнаруживать повышенный уровень электромагнитных помех, а затем при помощи регулирования времени накопления и величины помехоподавляющего конденсатора уменьшать этот уровень.

Глава 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ ОТ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ АВТОМОБИЛЯ

Электромагнитные помехи возникают от дугового разряда между электродами свечи при работе системы зажигания. Поэтому сначала в данной главе будет промоделирован дуговой разряд, а затем полученные результаты этого моделирования будут использованы для изучения самих электромагнитных помех от СЗ.

Решение проблем электромагнитной совместимости упрощенно сводится К выявлению электромагнитной обстановки, определению помехоустойчивости оборудования и в приведении их в соответствие друг другу. По этой теме уже проведена значительная исследовательская и практическая работа [14, 33, 34, 50], которая нашла отражение в создании нормативной базы в области ЭМС в таких международных организациях, как МЭК, СИСПР и им подобных. В настоящее время многие исследователи [50, 74, 75] продолжают вести работу по данному направлению, часто обращаясь к использованию математического моделирования при исследовании влияния электромагнитных помех. В данной работе математическое моделирование тоже будет задействовано, но прежде, чем к нему перейти, необходимо провести эксперимент по исследованию характеристик системы зажигания для адаптации математических моделей электрической дуги.

2.1 Экспериментальные исследования характеристик системы зажигания для адаптации математических моделей

Экспериментальные исследования характеристик системы зажигания автомобилей в ходе данной работы проводились на специальном диагностическом оборудовании, позволяющем произвести измерение высокого напряжения на катушке и в свече системы зажигания.

Основные научные результаты, направленные на подтверждение достоверности построенных математических моделей были получены при помощи многофункциональной платы АЦП L-783 с разрядностью 12 бит и тактовой частотой ЗМГц, установленной в персональный компьютер. Исследования производились на стенде, моделирующем работу системы зажигания марки СПЗ-16, а также на реальных автомобилях марок ВАЗ 11176 и ВАЗ 2170. Плата имеет 16 каналов ввод/вывод, из которых в ходе эксперимента использовалось только три — пропускная способность установки, таким образом, была около 1МГц на канал.

Для измерения высокого напряжения использовался делитель напряжения, через который многофункциональная плата АЦП L-783 подключалась к вторичной цепи системы зажигания (рисунки 2.1-2.2).

В ходе экспериментальных исследований были изучены следующие временные диаграммы:

- напряжения на свече зажигания $U_{\rm cB}(t)$ и на вторичной обмотке катушки зажигания $U_{2m}(t)$ от времени;
- тока разряда $I_{\rm p}(t)$, проходящего через свечу зажигания, от времени.

Учитывая, что любая неисправность в системе зажигания оказывает влияние на форму и параметры импульса высокого напряжения во вторичной цепи системы зажигания, снятие и анализ осциллограмм высокого напряжения позволяет комплексно диагностировать систему зажигания в целом [78, 83, 84]. Поэтому если знать нормальные параметры импульса зажигания и получить осциллограммы типовых неисправностей, то при анализе конкретной осциллограммы высокого напряжения можно опытным путем выявить неисправности исследуемой системы зажигания достаточно быстро и надёжно.

В том числе, одним из дублирующих устройств, используемых для измерения высокого напряжения при помощи делителя напряжения, была

звуковая карта Sound Blaster 16, подключавшаяся к персональному компьютеру.

Упомянутая выше звуковая плата Sound Blaster 16 является стандартным мультимедийным компонентом современных компьютеров и предназначена для записи и воспроизведения звуковых сигналов в диапазоне от долей герца до 50 кГц. Эта плата применяется как удобная и недорогая система сбора и обработки данных - одной из функций возможностей Sound Blaster 16 является ее работа в качестве двухканального запоминающего осциллографа.

Канал памяти звуковой карты включает в себя: АЦП, цифровой интерфейс, программный усилитель, коммутатор, и систему управления. Основными техническими характеристиками АЦП являются его разрядность и максимальная частота дискретизации - для звуковых карт этого типа они стандартны и составляют 16-, 18- или 20-битную разрядность и 44.1 или 48 кГц максимальную частоту дискредитации.

Применение звуковой карты в качестве осциллографа имеет несколько недостатков:

- нет возможности для точной количественной оценки амплитуды входного сигнала;
- имеется возможность регистрировать сигналы только переменного тока, частотой от долей герца до 50 кГц (этого, тем не менее, в нашем случае вполне достаточно для получения качественной картины);
- в момент включения и переключения сигналов в АЦП переходный процесс на входе карты искажает форму исходного сигнала.

При этом большим преимуществом звуковой карты являются отсутствие проблем, связанных с эффектом наложения частот.

Ввиду того, что нет возможности точной количественной оценки амплитуды входного сигнала, звуковая карта используется здесь только как аппарат качественной оценки параметров вторичной цепи системы зажигания. Для сравнения и подтверждения правильности указанных характеристик, а для

точной количественной оценки указанных параметров используется многофункциональная плата АЦП L-783 описанная ранее.

Следует отметить, что основным целью описываемого в данном разделе эксперимента является сравнение результатов эмпирических исследований, полученных в ходе проведения эксперимента с моделируемыми математически для того, чтобы затем проводить диагностику уровня ЭМП на основе эмпирических данных.

Сами испытания проводятся следующим образом: от автомобиля ВАЗ 11176 поочередно как от высоковольтного ввода катушки зажигания, так и от одной из свечей зажигания через делитель напряжения (10000:1) на АЦП платы L-783 (или звуковой карты) поступает аналоговый сигнал. Этот сигнал уже с помощью указанной многофункциональной платы представляется в цифровом виде и записывается в файл, обработка которого осуществляется специальным редактором, прилагаемым к данной карте, для представления входного сигнала в виде графика или спектра.

Схемы измерения показаны на рисунках 2.1 и 2.2. [28, 45, 52, 67]

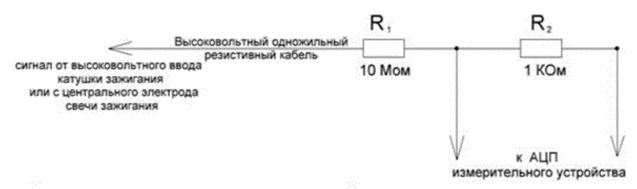


Рисунок 2.1 - Схема измерения напряжений с высоковольтного ввода свечи, а также катушки, зажигания

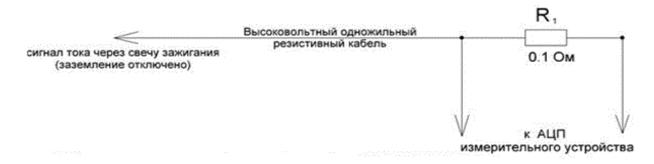


Рисунок 2.2 - Схема измерения тока через свечу зажигания

Полученные экспериментальные временные диаграммы представлены на рисунках 2.3 и 2.4:

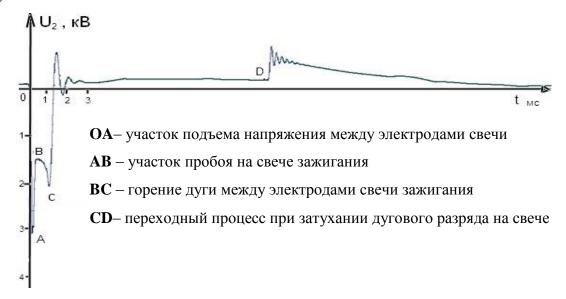


Рисунок 2.3 - Временная диаграмма напряжения на высоковольтном вводе катушки

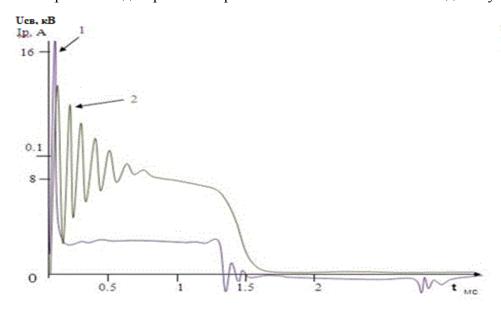


Рисунок 2.4 - Экспериментальные временные диаграммы напряжения на свече зажигания (1) и тока через электроды свечи зажигания (2)

При помощи полученных экспериментальных кривых можно судить о неисправностях в системе зажигания с целью их последующего устранения. Полученные экспериментальным путем графики, однако, не отражают всей полноты дуговых процессов в свече зажигания, в то время как для диагностики неисправностей в системе зажигания нужна более полная информация о типичных неисправностях СЗ. Для восполнения этой информации можно использовать осциллограммы, приведённые на рисунках 2.5 - 2.8. Причем

синяя кривая (1) является эталонной кривой вторичного напряжения на катушке зажигания, а красная кривая (2) показывает реальную характеристику для различных видов неисправностей.

Например, случай, когда время заряда катушки меньше требуемого (рисунок 2.5), свидетельствует о неисправности СЗ, приводящей к уменьшению энергии, запасенной в катушке, а, следовательно, к сокращению времени горения искры. В свою очередь, недостаток энергии может привести к пропускам зажигания при больших нагрузках, так как напряжение на вторичной обмотке катушки не будет достигать напряжения пробоя воздушного зазора свечи [16, 73, 78, 84].

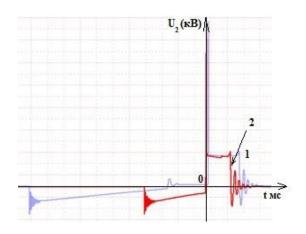


Рисунок 2.5- Характеристика неполного заряда катушки (2) в сравнении с синей эталонной кривой (1)

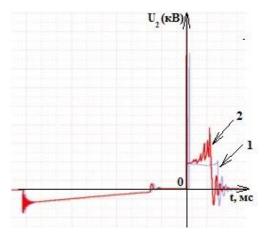


Рисунок - 2.6 Характеристика при увеличенном зазоре в свече зажигания

Осциллограмма на рисунке 2.6 свидетельствует об увеличенном зазоре в свече зажигания. Требуемое напряжение пробоя увеличивается, поэтому большая часть энергии будет тратиться на генерацию повышенного пробивного напряжения. Это приводит к значительному уменьшению продолжительности горения искрового разряда, что вызывает уменьшение надежности воспламенения топливовоздушной смеси и возрастание уровня ЭМП.

При работе двигателя под высокой нагрузкой, увеличенный искровой промежуток между электродами свечи зажигания может стать причиной

пробоя недостаточно прочной или поврежденной высоковольтной изоляции элементов системы зажигания (рисунок 2.7). В таком случае, искрообразование будет происходить вне камеры сгорания, что существенно уменьшает надежность этого процесса [16, 73, 78, 84].

Помимо этого, В микропроцессорных системах зажигания ток транзистором накопления коммутируется ИЛИ тиристором, поэтому дугогасительный конденсатор не применяется, вследствие чего в этих системах в качестве ёмкости колебательного контура выступает межвитковая емкость катушки. В случае неисправности изоляции катушки зажигания, паразитный искровой разряд между её витками отбирает часть энергии у полезного разряда в искровом зазоре свечи зажигания. С увеличением нагрузки на двигатель, доля отбираемой энергии искрового разряда увеличивается. Кроме того, существенно снижается и максимально возможное выходное напряжение, развиваемое катушкой зажигания [16, 71, 73].

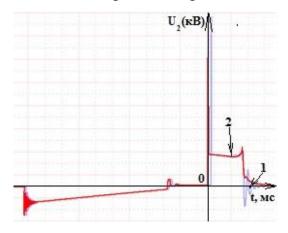


Рисунок 2.7 - Межвитковый пробой в катушке зажигания

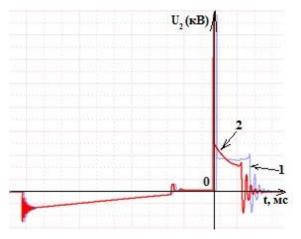


Рисунок 2.8 - Характеристика при высоком сопротивлении высоковольтного провода

Дополнительно к вышесказанному, у высоковольтного провода сопротивление может быть увеличенным (рисунок 2.8) вследствие окисления его контактов, старения или выгорания проводящего слоя высоковольтного провода, либо вследствие применения высоковольтного провода слишком большой длины [71, 73, 84].

Из графиков на рисунках 2.5 - 2.8 видно, что, получив эталонную кривую можно диагностировать некоторые неисправности в системе зажигания. Данный факт помогает косвенно диагностировать и увеличение уровня ЭМП - например, повышенный зазор в свече зажигания наиболее вероятно приведёт к резкому усилению помех. Кроме того, из рисунков 2.3 - 2.4 видно, что напряжение на свече $U_{\rm cB}(t)$ не соответствует напряжению на катушке зажигания $U_{2m}(t)$, что является важным фактом при анализе процессов в системе зажигания по следующим причинам:

- 1. Переходные процессы в свече и в катушке зажигания имеют отличия, что дает возможность связать работу катушки зажигания по параметру времени накопления заряда с разрядными процессами в свече зажигания для последующей диагностики неисправностей в них [51, 73].
- 2. Многофункциональная плата L 783, совместно с встроенным графическим редактором, способна фиксировать несоответствие измеряемых величин с требуемой точностью, фактически представляя собой рабочий аппарат эмпирического исследования дуговых процессов в системе зажигания автомобилей.

При проведении эмпирических исследований дуговых процессов в системе зажигания и выявления определённых специфических особенностей её работы, целесообразно рассмотреть вопросы математического моделирования дуговых процессов в свече зажигания, что в комбинации с эмпирическими данными может упростить оценку уровня ЭМП от системы зажигания для обеспечения её ЭМС с бортовыми системами автомобиля.

2.2 Анализ существующих математических моделей дуговых процессов

Для надежного воспламенения топливовоздушной смеси в камере сгорания ДВС необходимо, чтобы разряд между электродами свечи зажигания был устойчивым. Для систематического исследования энергетической устойчивости дугового разряда необходимо провести математическое моделирование электрической дуги как элемента электрической цепи.

В данном случае величинами, которые полностью характеризуют дугу, являются ток и напряжение. Таким образом, зависимость, связывающая ток и напряжение дуги, и будет являться её математической моделью. При моделировании также необходимо предварительно выбрать вид уравнения, связывающего ток и напряжение, что впоследствии позволит по эмпирическим данным определить параметры этого уравнения.

Выбор структуры модели во многом определяет её свойства, возможности и, в конечном итоге, применение на практике. Поэтому необходимо использовать все имеющиеся в распоряжении сведения об объекте моделирования — в нашем случае электрической дуге на свече зажигания, а также результаты уже проведённых аналитических исследований.

Аналитическое исследование процессов, происходящих в дуге между электродами свечи зажигания, на данный момент не дает надежных количественных данных о параметрах моделей дуги, но может послужить опорой при определении ее структуры. Аналитическая модель дуги, как элемента электрической цепи, базируется на исследовании уравнения переноса энергии. Это связано с тем, что тепловые процессы в дуге относятся к наиболее инерционным, и в основном они определяют ее динамические свойства [51].

Рассмотрим, следуя подходу, предложенному Брауном [51], один из методов получения структуры модели дуги:

$$\frac{dQ}{dt} = W - P \tag{2.1}$$

где Q — теплосодержание, W и P — мощности тепловыделения и теплоотвода.

В стволе дуги накопления энергии электромагнитного поля не происходит, поэтому описание дугового разряда в интегральных параметрах при переходном режиме удобно вести через активную проводимость разрядного канала в свече зажигания, которая является функцией теплосодержания[51]:

$$g = F(Q) \tag{2.2}$$

Принимая во внимание тот факт, что выделение тепла в дуге обусловлено только протеканием по ней тока, то после соответствующих преобразований получим обобщенную математическую модель дуги[51]:

$$\frac{1}{g}\frac{dg}{dt} = \frac{1}{F(Q)}\frac{dF(Q)}{dQ}(ui-P) \tag{2.3}$$

Известен ряд динамических моделей, основанных на различных представлениях механизма переноса энергии в стволе дуги [51, 56].В данной работе рассмотрены три наиболее распространенные на практике модели дугообразования и проведено их сравнение с экспериментальными данными. При этом подобрав наиболее подходящий для системы зажигания тип математической модели (ММ), можно будет его использовать и для построения новой ММ оценки уровня электромагнитных помех. Делается это для того, чтобы можно было создать систему с динамической настойкой параметров для реальных систем, базирующихся на предложенной и апробированной модели возникающих от СЗ электромагнитных помех.

Математическое описание модели Майра получено из рассмотрения процессов в дуге при допущении, что рассеивание тепловой энергии в радиальном направлении обусловлено только теплопроводностью. Этот подход базируется на предположении термической ионизации и постоянства диаметра ствола дуги в переходном режиме. Иными словами, мощность,

выделяющаяся в дуге, постоянна и не зависит от изменения тока, а с током изменяется температура дуги [51].

Таким образом, модель Майра может быть получена при условии:

$$F(Q) = g_0 e^{\frac{Q}{Q_0}}, P = P_0 = const$$
 (2.4)

где g_0 , Q_0 , P_0 — постоянные, что ведёт к следующей форме результирующей модели дуги:

$$\frac{\Theta}{g}\frac{dg}{dt} = \frac{ui}{P_0} - 1\tag{2.5}$$

Учитывая, что $\Theta = {Q_0}/{P_0}$, $g = \frac{i}{u}$, а ${du_{c_i}}/{dt} = \frac{i}{c_i}$, уравнение (2.3) в параметрах Uи I, можно записать в следующем виде [51]:

$$\frac{1}{i}\frac{di}{dt} - \frac{1}{u}\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{\Theta}\left(\frac{ui}{P_0} - 1\right) \tag{2.6}$$

Математическое описание процессов дугообразования на основании модели Касси получено в предположении, что в процессе охлаждения продольно обдуваемой дуги преобладает конвекционный отвод тепла, пропорциональный сечению дуги, при фиксированной температуре в пространстве и времени. Иными словами, этот анализ основан на предположении, что температура в стволе дуги постоянна и не зависит от тока, в то время как мощность в стволе дуги изменяется с током [51]. В результате таких предположений была получена альтернативная модель дуги в следующей форме:

$$\frac{\Theta}{g}\frac{dg}{dt} = \left(\frac{u}{u_0}\right)^2 - 1\tag{2.7}$$

По аналогии с (2.6) в параметрах Uи I последнее уравнение можно записать как:

$$\frac{1}{i}\frac{di}{dt} - \frac{1}{u}\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left[\left(\frac{u}{u_0} \right)^2 - 1 \right], \tag{2.8}$$

где u_0 – напряжение на дуге в установившемся режиме.

В качестве исходного уравнения для адаптивного моделирования дуги на основе модели Новикова [51] вводится уравнение вида:

$$B_1 \frac{dg}{dt} + B_2 \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} + B_3 \frac{d(ui)}{dt} = ui - B_4 - gB_5, \tag{2.9}$$

где $B_1 = \Psi, B_2 = Q, B_3 = \alpha, B_4 = P, B_5 = K$, - параметры дуги.

При этом динамические свойства дуги определяются коэффициентами, а статическая вольтамперная характеристика имеет следующий вид:

$$ui - P - gK, (2.10)$$

где u, i, g— соответственно напряжение, ток и проводимость; P, K- коэффициенты.

Выбранная структура удовлетворяет следующим требованиям:

- широкого охвата известных моделей дуги;
- удобства реализации;
- ограничения сложности модели.

В частности, модель Новикова (2.9) при $\Psi=0,\ \alpha=0$ сводится к модели Майра, а при $Q=0,\ \alpha=0$ - к модели Касси.

В заключение данного раздела приведем сравнение различных подходов, применяемых к анализу процессов дугообразования. В случае с системой зажигания, которая воспламеняет рабочую смесь в камере сгорания двигателя, теория Касси менее правдоподобна из-за того, что условия зажигания рабочей смеси и нагрузка постоянно меняются (пуск, разгон, движение с постоянной скоростью при постоянной нагрузке и тому подобное). А так как давление в камере сгорания постоянно изменяется, то вследствие этого, условия горения и отвода тепла от дуги будут переменными. Поэтому утверждение, что температура в стволе дуги постоянна и не зависит от тока, практически необоснованно.

На основе эмпирических исследований [51, 56], проводимых в различных условиях и для различных значений Uи I, можно утверждать, что теория Касси адекватна при больших токах (сотни ампер), а теория Майра—

при малых токах. Поэтому для систем зажигания, где токи в условиях горения дуги составляют 30-100мА, модель Майра наиболее полно описывает дуговые процессы в свече зажигания. Но есть еще и другие модели – например, модель Новикова, которая, как уже было отмечено, обобщает и модель Майра, и модель Касси.

Поэтому в следующем разделе будет проведён сравнительный анализ вышеперечисленных моделей дуговых процессов, применённых к системам зажигания — целью анализа является выбор улучшенной модели и её адаптация для получения наибольшего соответствия с экспериментальными данными.

2.3 Улучшение математической модели дуговых процессов для анализа электромагнитной совместимости системы зажигания

Улучшение математической модели дуги в свече зажигания производится по методу Рунге-Кутта в среде MathCAD 2000 [23]. Электрическая дуга моделируется системой из пяти дифференциальных уравнений, составленных на основе приведённой ниже схемы замещения С3:

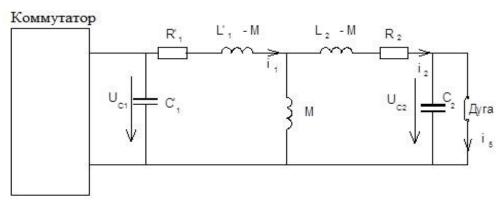


Рисунок 2.9 – Электрическая схема замещения системы зажигания

В данную схему входят:

- коммутатор, получающий сигналы с датчиков и коммутирующий ток разрыва, который протекает по первичной обмотке катушки зажигания;

- *катушка зажигания*, моделируемая посредством эквивалентной схемы замещения;
 - *дуговой промежуток* между электродами свечи зажигания;
- распределитель, сигнал на который поступает с выхода катушки зажигания, он выполняет функцию распределения высоковольтных импульсов по проводам (в современном исполнении нет механических распределителей, распределение импульсов идет на индивидуальные катушки через ЭБУ);
- *высоковольтные провода*, рассматриваемые как проводниковый материал.

Исходя из схемы замещения, составляются пять дифференциальных уравнений по числу неизвестных величин, для которых необходимо получить их зависимость от времени ($i_l(t)$, $U_{cl}(t)$, $i_2(t)$, $U_{c2}(t)$, $i_5(t)$). Причем $i_l(t)$ —ток в первичной обмотке катушки зажигания, $U_{cl}(t)$ — напряжение на первичной обмотке катушки зажигания, $i_2(t)$ — ток во вторичной обмотке катушки зажигания, $i_5(t)$ — ток дуги. Первые четыре уравнения составляются на основе токов и напряжений первичной и вторичной обмоток катушки зажигания при работе на холостом ходу. Нагрузкой данной катушки зажигания является дуга в свече зажигания, уравнение тока которой является нелинейным и приводится в пятом уравнении нижеследующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_{1}^{'}}{dt} = k_{1} \left(u_{c_{1}}^{'} + i_{1}^{'} r_{1}^{'} \right) + k_{2} \left(u_{c_{2}} + i_{2} r_{2} \right) \\ \frac{du_{c_{1}}^{'}}{dt} = \frac{1}{c_{1}^{'}} i_{1}^{'} \\ \frac{di_{2}}{dt} = k_{3} \left(u_{c_{1}}^{'} + i_{1}^{'} r_{1}^{'} \right) + k_{4} \left(u_{c_{2}} + i_{2} r_{2} \right) \\ \frac{du_{c_{2}}}{dt} = \frac{1}{c_{2}} \left(i_{2} - i_{5} \right) \\ \frac{di_{5}}{dt} = \frac{\left(i_{2} - i_{5} \right) \cdot i_{5}}{c_{2} u_{c_{2}}^{'}} + \frac{1}{\theta} \left(\frac{u_{c_{2}} i_{5}^{2}}{|U_{0} i_{5}| + P_{0}} - i_{5} \right) \end{cases}$$

$$(2.11)$$

где k_1 = - 0,5885; k_2 = - 0,5859; k_3 = - 0,586; k_4 = - 0,626 — коэффициенты связи для приведенной схемы катушки зажигания, P_0 — мощность, выделяемая в дуге, а θ — постоянная времени дуги; при этом начальные условия для данных токов и напряжений берутся из расчета 1% от номинальных значений.

Последнее пятое уравнение получено по модифицированной модели Майра посредством преобразования формулы (2.6) относительно тока дуги $i_5(t)$. Для двух других моделей пятое уравнение аналогично заменяется либо уравнением, написанным по модели Касси (2.8), либо по модели Новикова (2.9). При этом получаемые математические модели под результаты экспериментов, описанных в предыдущем разделе и показанных на рисунках 2.3 и 2.4, для получения наилучшего соответствия экспериментальным данным. Адаптация осуществляется изменением параметров дугового разряда $C_1; C_2; P_0; U; \theta$.

Особенно интересен график напряжения на дуге (рисунок 2.10 кривая 2 – модель Майра). Результатом экспериментальных исследований с многофункциональной платой АЦП L-783 явилось подтверждение с приемлемой для инженерных расчетов погрешностью адекватности разработанных математических моделей, что иллюстрируется следующими графиками:

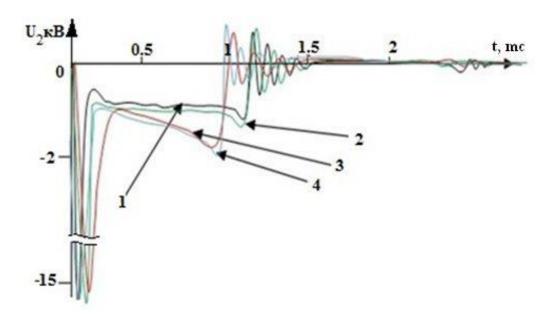


Рисунок 2.10 – Экспериментальная кривая временной диаграммы напряжения на вторичной обмотке катушки зажигания (1), модель Майра (2), модель Касси (3) и модель Новикова (4).

Анализ кривых на рисунке 2.10 можно обобщить следующим образом:

- 1. Между кривыми, записанными при помощи АЦП и математическими моделями, полученными в MathCAD, наблюдается соответствие более детальное их сравнение показывает также близкое соответствие по параметру динамической погрешности при различных искажениях участка горения дуги и участка затухания.
- 2. Модель Майра наиболее близка к экспериментальной кривой (динамическая погрешность 5%), так как на ней участок горения дуги более стабилен, но при этом участок затухания выражен слабо (динамическая погрешность 12%).
- 3. В модели Касси (3) и модели Новикова (4) участок горения дуги менее стабилен по отношению к экспериментальной кривой (динамическая погрешность соответственно 20%), но модель Новикова дает наиболее приближенный к экспериментальному участок затухания (динамическая погрешность 15%), который в модели Касси выражен менее точно (динамическая погрешность 25%).

Проведённый сравнительный анализ создает практическую основу для исследований по улучшению системы зажигания (СЗ) в аспекте улучшения её электромагнитной совместимости с электрооборудованием внутри и вне автомобиля. Экспериментально достичь указанных целей сложно и не всегда возможно, так как вариантов взаимовлияний системы зажигания на другие системы много. Поэтому целесообразно снова прибегнуть к математическому моделированию, но уже электромагнитных помех, генерируемых дуговыми процессами, протекающими в системе зажигания ДВС.

2.4 Математическое моделирование источника электромагнитных помех от системы зажигания

Улучшенную Майра модель применим моделирования ДЛЯ электромагнитных помех от системы зажигания. Мы знаем, что система зажигания (СЗ) имеет плохую электромагнитную совместимость (ЭМС) с другими бортовыми системами автомобиля и внешними устройствами, находящимися поблизости. Поэтому для оценки меры взаимодействия системы зажигания с данными устройствами нужно связать дуговые процессы между электродами свечи зажигания с уровнем и частотным диапазоном помех, возникающим при работе СЗ. Как уже было сказано, данные взаимодействия реализуются при помощи математического моделирования дуговых процессов в свече зажигания с последующей обработкой результатов моделирования, осуществляемого при помощи четырехполюсника, который работает в режиме длинной линии (что обусловлено высокими частотами указанными ниже). Результатом данной работы является выявление уровня помех, что можно использовать для ЭМС системы зажигания с другими устройствами.

В процессе работы система зажигания (СЗ) часто оказывается в сложных условиях, таких как обгон, резкое торможение, а также сложные погодные

условия. Все эти факторы приводят к более интенсивному использованию системы зажигания, а значит к усилению ЭМП от нее [6, 57, 84].

При этом четвертое и пятое уравнения в (2.11), фактически являются выходными данными с модели Майра, которая наилучшим образом описывает дуговые процессы в свече зажигания (2.6), можно преобразовать в функцию помех. Для того чтобы осуществить данное преобразование нужен фильтр, который лучше всего представить в виде электрической схемы четырехполюсника.

В случае с системой зажигания, следует упомянуть, что наибольшая по энергетическая составляющая интенсивности помех приходится на высокочастотный диапазон от 30МГц до 400МГц, в котором сосредоточена около 90% мощности электромагнитных помех [5, 50]. Для данного диапазона помех нельзя пренебрегать токами смещения и проводимостью изоляции [9].

Электрические цепи, в которых данное условие является обязательным, называются цепями с распределенными параметрами или длинными линиями. Чтобы учесть изменение тока и напряжения вдоль линии, примем допущение, что каждый сколь угодно малый элемент линии обладает сопротивлением и индуктивностью, а между проводами — проводимостью и ёмкостью. Если индуктивность, сопротивление, проводимость и ёмкость равномерно распределены вдоль линии, то такую линию называют однородной, и она может быть изображена, как показано на рисунке 2.11 [9].

На данном рисунке мы видим две части. Первая часть показывает распространение ЭМП в системе индивидуальная катушка зажигания — свеча зажигания. Вторая часть показывает распространение ЭМП по воздуху, что оказывает влияние на работу бортовой системы контроля автомобиля и устройств, расположенных снаружи от автомобиля. При математическом моделировании ЭМП от систем зажигания, которая является источником помех, важно учесть следующие обстоятельства:

1 Для анализа ЭМС систем зажигания надо определить напряженности электрического поля и индукции магнитного поля для плоской

электромагнитной волны в диэлектрике, но при рассмотрении этого вопроса выясняется, что уравнения описывающие данные характеристики по форме совершенно аналогичны уравнениям, полученным при рассмотрении переходных процессов в неискажающей однородной длинной линии [9]. Используем данное обстоятельство и упрощаем расчет, осуществляя анализ переходных процессов в неискажающей однородной длинной линии для получения математической модели источника помех (источником ЭМП является система зажигания), при этом выходными данными являются напряжение и ток ЭМП;

2На вход длиной линии поступают выходные данные с модели Майра, которыми являются напряжение и ток дугового разряда, а на выходе длинной линии мы получаем напряжение и ток ЭМП от системы зажигания.

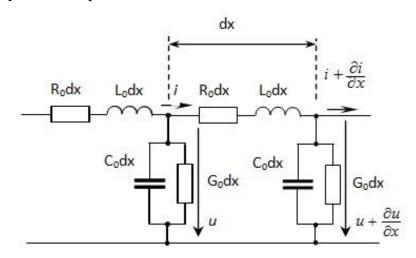


Рисунок 2.11-Двухпроводная однородная линия

Параметры четырехполюсника, моделирующего переходные процессы в длинных линиях, для установления зависимости электромагнитных помех от работы системы зажигания автомобиля имеют вид:

$$R_{0\Sigma} = 10 \text{ (MOM)}; U_1 = 1000 \text{ (B)}; \implies I_{1P} = 0.1 \text{ (MA)}; P = 0.1 \text{ (BT)}; \delta_1 = 0.1\%.$$

Решая систему уравнений однородной неискажающей длинной линии при переходном процессе [9], получаем напряжение и ток ЭМП от системы зажигания автомобиля u_n , i_n :

$$\begin{cases} u_n = \varphi(x - vt)e^{-\alpha x} - \psi(x + vt)e^{\alpha x} \\ i_n = \sqrt{\frac{C}{L}} [\varphi(x - vt)e^{-\alpha x} - \psi(x + vt)e^{\alpha x}] \end{cases}$$
 (2.12)

где x=l - длина линии, $f \in (0.1 \div 100 \text{ M}\Gamma \text{ц})$, $u_{\varphi} = \varphi(x-vt)e^{-\alpha x}$, $u_{\psi} = \psi(x+vt)e^{\alpha x}$ - напряжения прямой и обратной волны, sh(y) и ch(y) - гиперболический синус и косинус (2.13).

$$sh(\dot{\gamma}l) = \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}, \ ch(\dot{\gamma}l) = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2}$$
 (2.13)

Исходя из анализа однородной длинной линии, находим напряжение прямой и обратной волны (2.14) при нулевых начальных (граничных) условиях [9]:

$$\dot{U}_{\varphi} = \frac{1}{2} (\dot{U}_{1} + \dot{I}_{1} Z_{e}) e^{-\gamma x} = \dot{U}_{\varphi_{1}} e^{-\gamma x}$$

$$\dot{U}_{\psi} = \frac{1}{2} (\dot{U}_{1} - \dot{I}_{1} Z_{e}) e^{\gamma x} = \dot{U}_{\psi_{1}} e^{\gamma x}$$
(2.14)

Зная, что $\gamma = \alpha + j\beta$, а Z_g - волновое сопротивление, то согласно полученному в (2.12) в итоге имеем:

$$\dot{U}_{n} = \dot{U}_{\varphi} + \dot{U}_{\psi} = \dot{U}_{\varphi_{1}} e^{-\gamma x} + \dot{U}_{\psi_{1}} e^{\gamma x} = \dot{U}_{\varphi_{1}} e^{-\alpha x} e^{(\phi_{0}^{-\beta x})} + \dot{U}_{\psi_{1}} e^{\alpha x} e^{(\eta + \beta x)}$$
(2.15)

Аналогичную формулу получим для \dot{I}_n .

Отсюда математическую модель помех (2.16 - 2.18) можно записать как алгебраическую сумму гармоник на определенный момент времени:

$$u_n(f,t) = \sum_{k=1}^{1000} u_{kn}(t),$$

$$i_n(f,t) = \sum_{k=1}^{1000} i_{kn}(t),$$
(2.16)

где $u_{k_n}(t)$ и $i_{k_n}(t)$ - это гармоники тока и напряжения, причем первая гармоника соответствует частоте f=0.1 (МГц), при допущении, что амплитуда напряжения дуги у всех гармоник постоянна и равна 1000 (В), общее число гармоник примем равным 1000. Каждая из гармоник описывается уравнением:

$$u_{kn}(t) = U_{m\phi_1} e^{-\alpha x} \sin(k\omega t - \beta x + \phi_0) + U_{m\psi_1} e^{\alpha x} \sin(k\omega t + \beta x + \eta)$$
 (2.17)

$$i_{kn}(t) = \sqrt{\frac{C}{L}} \left[U_{m\phi_1} e^{-\alpha x} \sin(k\omega t - \beta x + \phi_0) + U_{m\psi_1} e^{\alpha x} \sin(k\omega t + \beta x + \eta) \right]$$
 (2.18)

Причем $U_1 = U_{c2}$ — это напряжение между электродами свечи зажигания, $I_1 = I_5$ — ток дуги, производные которых показаны в четвертом и пятом уравнении в системе уравнений (2.11). Их значения известны с достаточно высокой точностью ($U_1 = U_{c2} = 1$ -1.5 кB; $I_1 = I_5 = 30$ -100 мA) и их характеристики также известны из вышеприведенной (2.11) модели.

Мы знаем, что напряжение $U_1 = U_{c2}$ и ток $I_1 = I_5$ в (2.20) являются входными данными четырехполюсника и, исходя из этого, находим функцию помех $u_n(f,t)$, $i_n(f,t)$, на основании включенных в модель уравнений (2.16-2.18). Далее по найденным значениям, мы можем диагностировать повышенный уровень помех. После этого можно устранять помехи или уменьшать их уровень при помощи либо традиционных способов (демпферный резистор, заземление, конденсатор), либо с помощью интеллектуальных датчиков, встроенных в бортовые системы диагностики.

При моделировании функции помех $u_n(f,t)$, и $i_n(f,t)$, получаемых с выхода четырехполюсника, имеем погрешность полученной математической модели системы без демпферного резистора по отношении к аналогичным экспериментальным данным на рисунке 2.12 в диапазоне 7 % по уровню помех. Погрешность такого уровня дает нам право утверждать о соответствии нашей математической модели и экспериментальных данных.

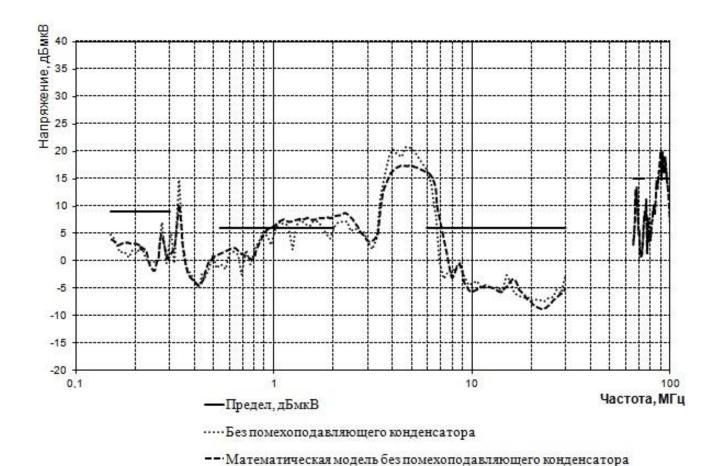


Рисунок 2.12 – Экспериментальные диаграммы электромагнитных помех от системы зажигания

Показано, что математическая модель достаточно точно описывает экспериментальные данные, так как на рисунке 2.12 погрешность составляет 7%, что говорит о правильном подходе при моделировании. Данную погрешность можно уменьшить с помощью систем искусственного интеллекта.

Для обеспечения соответствия ЭМС в процессе эксплуатации и возможности проектирования систем зажигания с учетом требований ЭМС необходимо производить своевременную диагностику параметров системы зажигания в режиме реального времени и внебортовую диагностику при периодическом обслуживании. При этом необходимо, чтобы результаты моделирования, описанные в данной главе, были заложены в бортовые системы диагностики, чтобы можно было своевременно диагностировать неисправность. Эти задачи будут решаться в следующих главах.

2.5 Выводы к главе

- 1. В первой главе показано, что электромагнитная совместимость системы зажигания часто оказывается хуже, чем требуется, и чтобы оценить данные изменения, произведено математическое моделирование дуговых процессов в свече зажигания.
- 2. Установлено, что переходный процесс на свече зажигания кардинально отличается от переходного процесса на катушке зажигания, что дает возможность связать работу катушки зажигания по параметру времени накопления заряда с разрядными процессами в свече зажигания для последующей диагностики неисправностей в них.
- 3. Доказано, что модель Майра при математическом моделировании дуговых процессов в свече зажигания, где токи в условиях горения дуги составляют 30- 100мА, наиболее близка к экспериментальной кривой, так как на ней участок горения дуги более стабилен (динамическая погрешность 5%), но при этом участок затухания выражен слабее (динамическая погрешность 15%).
- 4. Рассчитанная динамическая погрешность математической модели источника электромагнитных помех u_n (f,t), и i_n (f,t), полученных с выхода четырехполюсника от системы зажигания, без демпферного резистора по отношению к аналогичным экспериментальным данным в диапазоне 7 % по уровню помех. Погрешность такого уровня позволяет нам утверждать о соответствии данной математической модели экспериментальным данным.

Глава 3 ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПРИЧИН УХУДШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ У СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ АВТОМОБИЛЯ

По причине широкополосных помех от системы зажигания необходимо проводить своевременную диагностику её параметров для обеспечения требуемого уровня электромагнитных помех в процессе эксплуатации систем зажигания и для возможности проектирования СЗ с учетом требований электромагнитной совместимости.

Функционирование бортовых диагностических систем, осуществляющих проверку ЭМС, может базироваться на математических моделях, предложенных в предыдущей главе, что позволило бы улучшить надёжность и быстродействие диагностических процедур.

Для постановки задач, связанных с необходимостью повышения надёжности и быстродействия диагностики неисправностей СЗ, необходимо разработать концептуальную модель диагностического процесса применительно к автомобильному электрооборудованию и провести экспериментальные исследования по электромагнитной совместимости данного оборудования с системой зажигания на различных частотах для определения приемлемого уровня электромагнитных помех.

Научные результаты экспериментальной части данной диссертационной работы (Главы 2-3) по электромагнитной совместимости получены с использованием сертифицированного оборудования лаборатории В электромагнитной совместимости дирекции по развитию OAO «ABTOBA3». Указанные эксперименты подтверждены применением предложенного в интеллектуального диагностического комплекса ДЛЯ системы определения превышения уровня помех (описано в Главе 4), а также СПЗ-16, экспериментальной проверкой результатов стенде на ДЛЯ автомобилей LADA 11176, BA3 2170», в период 2012 – 2014 гг.

3.1 Разработка концептуальной модели диагностики электрооборудования на базе интеллектуальноинформационных систем

Строгое регламентирование технических и экологических характеристик двигателей внутреннего сгорания требует от производителей автомобилей совершенствовать, а также разрабатывать новые, методы и средства контроля и диагностики. Как было отмечено в предыдущем разделе, современные ДВС контролируются микропроцессорными системами (ЭБУ), использующими физические датчики, измеряющие различные входные и выходные параметры двигателя (такие, например, как давление во входном коллекторе, температуру, расход воздуха и им подобные), а также учитывающие режим работы двигателя и сопутствующий этому уровень электромагнитных помех.

Наличие микропроцессорных систем и возможность использования виртуальных датчиков внутри системы управления ДВС (см. Раздел 1.8), в том числе в системе зажигания и внутри других исполнительных устройств современных автомобилей, создаёт благоприятную среду для построения интеллектуальных информационных систем (ИИС) на виртуальной основе.

Данная глава сфокусирована на разработке ИИС для определения величины ЭМП от систем зажигания, где под ИИС понимается система, объединенная информационным процессом совокупности технических средств и программного обеспечения, работающая во взаимосвязи с человеком (коллективом людей) или автономно. ИИС способна на основе сведений и знаний при наличии мотивации синтезировать цель, вырабатывать решение о действии и находить рациональные способы достижения сформулированной цели [59, 79].Задачи данного исследования подразумевают синтез цели - поэтому блок генерации цели будет опущен из дальнейшего рассмотрения, а соответствующая обобщенная структура ИИС может быть представлена следующим образом (смотри рисунок 3.1):



Рисунок 3.1 - Система зажигания, поддерживаемая интеллектуально информационной системой

Интеллектуально-информационная система вырабатывает экспертную $\overline{Y^*}$, на основе которой принимается решение к действию по изменению уровня, генерируемого ЭМП, причем управляющее воздействие обеспечивается для достижения поставленной изначальной цели (выработка управления), далее прогнозируется значение результата действия (экспертная оценка), которые сопоставляются с реальными результатами и представляются в виде символьной информации. Тем самым образуется обратная связь для корректировки экспертной оценки или управления при возникновении такой необходимости.

ИИС может реализовываться на базе бортовой системы контроля (БСК), которая на основании текущих сведений об окружающей среде, например, по уровню ЭМП и другим параметрам объекта управления, осуществляет экспертную оценку. Полученная оценка преобразуется ИИС в физический

сигнал и поступает на исполнительные устройства. Объект управления, получая сигнал от исполнительных устройств, осуществляет требуемое действие, результаты которого поступают в БСК по цепи обратной связи, где они сравниваются с прогнозируемыми результатами.

Таким образом, БСК представляет собой комплексное образование, способное оценивать состояние объекта измерения и среды, сопоставлять параметры желаемого и реального результатов действия, принимать решение об адекватности работы объекта и вырабатывать в соответствии с этим решением управляющее воздействие, способствующее результативному достижению поставленной цели. Для этого бортовая система контроля должна обладать запасом знаний, хранящихся в базе данных, ассоциируемой с интеллектуальной информационной системой, и показанной на рисунке 3.1.

Диагностическая интеллектуальная информационная система, разработанная в ходе данной работы, представляет собой демонстрационный прототип, показывающий целесообразность и реализуемость предложенного ниже подхода к контролю соблюдения требований по ЭМС электрооборудования автомобиля.

В настоящем исследовании диагностические данные обрабатываются с помощью алгоритмов классификации, выполненных в программной среде ВЕКА (версии 3.6.8.) для интеллектуального анализа данных, и с помощью вычислительного эксперимента, использующего метод опорных векторов, реализованный в другой среде программирования - ENCOG Workbench (версия 3.1). Покажем далее краткое описание этих программных продуктов:

1BEKA;

Среда разработки Waikato для приобретения знаний (BEKA) обеспечивает удобство и легкий доступ к методам машинного обучения [89, 116]. Программный пакет BEKA получил широкое распространение для решения научных и научно-ориентированных задач, как универсальный инструмент анализа данных.

Три алгоритма из этой программной среды были использованы в данном исследовании:

- Zero-R: базовый алгоритм классификации, который определяет основной класс данных для большинства случаев, и, как правило, используется в качестве основы для сравнения классификаторов.
- *One-R*: другой алгоритм классификации, который является более сложным. Он определяет набор правил (по одному на каждый признак) и выбирает правило с наименьшей ошибкой прогноза классификации.
- *J-48*: выполненный в ВЕКА алгоритм С4.5 дерева принятия решений, разработанный Джоном Квинланом [115]. Алгоритм строит деревья решений для классификации из выборки данных признак с самым высоким показателем нормирования данных используется для принятия решения о классификации.

2ENCOG.

ENCOG также является средой разработки программ машинного обучения, предложенной Д. Хитон [100] и содержащей различные классы для создания широкого спектра алгоритмов обработки, а также поддержки операций для нормализации данных.

Базируясь на функциональных схемах работы интеллектуальных датчиков, приведённых на рисунках 1.19 и 1.20, можно предложить нижеследующую структуру интеллектуальной системы диагностики уровня электромагнитных помех от системы зажигания ДВС:



Рисунок 3.2 - Интеллектуальный датчик как ключевой компонент ИИС диагностики уровня ЭМП от системы зажигания

Основным блоком ИИС является интеллектуальный датчик, который на основании текущих сведений об окружающей среде и состояния объекта управления, в нашем случае - системы зажигания ДВС, осуществляет оценку комплексных характеристик диагностируемой системы. Данные об окружающей среде мы получаем с физических датчиков (Датчик 1, Датчик 2, Датчик n), таких как датчик положения коленчатого вала, датчик массового расхода воздуха, датчик скорости, датчик измерения электромагнитных полей и так далее. В результате полученная интеллектуальным датчиком оценка преобразуется бортовой системой контроля в физический сигнал и поступает на вход системы зажигания, которая является исполнительным устройством, реагирующим на этот сигнал.

Таким образом, ИИС должна быстро и точно оценивать состояние объекта диагностики и среды, где она работает [116]. По этой причине от ИИС

требуется, чтобы она имела возможность в процессе своего функционирования сохранять и приобретать диагностические знания, которые нацелены на решение наиболее важной задачи любой диагностической системы — а именно, обнаружение и классификацию неполадок (ОКН), для решения которой используют подходы, описанные в разделе 1.7. При этом данные знания обеспечивают базу математического моделирования (ММ), в то время как алгоритмические знания особенно полезны для реализации диагностики на основе данных (ДД подход).

Внутри вышеуказанных подходов находят всё более широкое применение искусственного методы интеллекта, основанные разнообразных моделях обнаружения и классификации неполадок. Поэтому интеллектуальный подход, реализуемый ИИС, все чаще используется для решения сложных проблем в различных технических областях, в том числе и в автомобильной диагностике. Несколько интеллектуальных систем были разработаны и применены в области диагностики с целью повышения эффективности ОКН (распределенные диагностические средства)[105]. Кроме того, диагностика на основе искусственного интеллекта ОКН по-прежнему остается единственным вариантом обнаружения ранее не встречавшихся неисправностей [59, 61].

Поэтому имеется несколько причин для интеграции искусственного интеллекта в выявление, анализ и прогнозирование электромагнитных помех в различных условиях эксплуатации транспортного средства. Для систематизированного применения методов искусственного интеллекта в данной работе предложена концептуальная модель (смотри рисунок 3.3), которая адаптирует к процессу ОКН многоуровневую схему, заимствованную из структуры интеллектуального анализа данных [59].

Каждый уровень или слой этой схемы предназначен для определённых задач обработки данных, начиная от низшего уровня сбора диагностических данных, через обработку и анализ полученных данных, и до высшего уровня

интерпретации данных с использованием либо существующих, либо приобретенных знаний.

| | | Выполняемые операции | Используемые методы | Примеры применений | |
|--|-------------------------|---|--|--|--|
| Высокий | интерпретация данных | Построение базы знаний | Прогностическое техническое обслуживание | Проверка электромагнитной совместимости | |
| | MHTEP | Интерпретация данных | Оценка допущений | Диагностика неисправностей | |
| Уровень абстранции (степень использования искусственного интеллента) | анализ данных | Классификационные модели | Машинное обучение + Вычислительный интеллект | ИНС + метод опорных векторов | |
| | AHAЛИЗ | Прогнозирующие модели, базирующиеся на данных | Модели, основанные на правилах, и регрессионные модели | Дерево принятия решений | |
| | обработка данных | | Определение резко | Цифровая обработка сигналов | |
| | | Определение характерных особенностей | отклоняющихся значений | Проверка сигналов | |
| | OSPAE | | Проверка гипотез | Наличие аномальных помех | |
| низкий | жор данных | Нормализация диапазона и | Статистические методы | Распределение, средний уровень и аномальные значения ЭМП | |
| ЖИ | | визуализация данных | Мониторинг | Радиопомехи от свечи зажигания | |

Рисунок 3.3- Концептуальная модель диагностики электромагнитных помех от системы зажигания 1

Низкий уровень абстракции соответствует сбору диагностических данных по ЭМП (пробег, угол опережения зажигания, тип топлива и т.д.), включая их визуальное представление и подготовку для дальнейшего анализа. Второй уровень осуществляет обработку полученных данных (такую, например, как определение резко выделяющиеся значений, исключение

¹Закрашенные блоки концептуальной модели были реализованы в ходе данной исследовательской работы

пропущенных значений и тому подобное) с определением их характерных особенностей. Основной функцией второго уровня является выделение наиболее важных входных переменных, наиболее существенных при построении диагностических моделей с хорошими возможностями обобщения.

Остальные уровни предлагаемой концептуальной модели работают на более высоком уровне абстракции, что позволяет применять на них методы искусственного интеллекта. В частности, третий уровень отвечает за создание, оценку и корректировку (при необходимости) моделей, основанных на используемых диагностических данных. В этой концептуальной модели особая роль отводится методу искусственных нейронных сетей (ИНС) и методу опорных векторов (МОВ), которые имеют большое значение в диагностике уровня ЭМП. Задачей последнего уровня является интерпретация диагностических данных в результате обобщения полученных моделей и углубления знаний о принципах обнаружения и устранения неисправностей в объектах и системах, проходящих диагностику. Четвертый уровень модели реализует концепцию интеллектуального диагностического комплекса (ИДК) способного идентифицировать причины повышенного уровня ЭМП от системы зажигания, что подробно описывается в следующем разделе.

3.2 Интеллектуально-информационная система для диагностики состояния электрооборудования автомобиля

Вопрос о проектировании и создании интеллектуальных систем для автоматической идентификации и прогнозирования уровня электромагнитных помех в транспортных средствах является актуальным и практически значимым, о чём детально говорилось в Главе 1. Концептуальные основы моделирования данных и системного анализа позволяют решать многие технические задачи, в том числе задачи идентификации и классификации ЭМП, а экспериментальные результаты подтверждают целесообразность использования интеллектуального анализа данных для обнаружения неисправностей [61, 72].

Разработка алгоритма диагностики неисправностей. Несмотря на проведенные обширные теоретические и экспериментальные исследования электромагнитных помех систем зажигания, тестирование на выполнение требований по ЭМС из-за электромагнитных помех от системы зажигания (или наводимых извне) на электрооборудование автомобиля по-прежнему остается не до конца решенной задачей, сохраняя при этом трудоемкость и ресурсную дороговизну [61]. Экспериментальный анализ механизма разряда зажигания в значительной степени зависит от настройки эксперимента в лабораторных условиях, а эффективная диагностика неисправностей в реальных условиях эксплуатации всё ещё остается проблематичной.

Современные методы обнаружения неисправностей систем автомобиля, базируются на правилах и эмпирических закономерностях, которые тяжело использовать как экспертные знания в силу их зависимости от конкретных марок автомобилей. Хотя существующие диагностические модели на базе экспертных систем достаточно точны, их выбор и настройка весьма ресурсоемки и, следовательно, слишком дороги для широкого применения. Таким образом, автомобильная промышленность нуждается в эффективной диагностике неисправностей, которая является более универсальной и

использующей вычислительные возможности таких технологий, как микропроцессорные системы управления двигателем (СУД) и интеллектуально - информационные диагностические системы.

В частности, для выявления неисправностей, связанных с ЭМП электрических систем автомобиля, возможно получение диагностических данных сразу из нескольких источников — как с физических датчиков, радиоприёмников, фиксирующих уровень радиопомех [33] или с испытательных стендов функционирования электрических систем (СПЗ-16), так и из файлов или баз данных с сохранённой диагностической информацией. Каждый из источников представляет некий информационных ресурс, вливающийся в общий поток диагностических данных, поступающих на вход ИИС определения повышенного уровня ЭМП.

Для более результативной обработки этого потока данных в данной работе был предложен поэтапный системный подход, проиллюстрированный на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 - Стадии процесса диагностики уровня ЭМП

Как видно из вышеприведённого рисунка, поток диагностических данных поэтапно проходит через стадии *идентификации* наличия неисправностей, *классификации* неисправностей по возможной причине возникновения, и в завершении – *прогнозирования* режима дальнейшей работы

диагностируемой системы. Реализация этих этапов обработки диагностических данных производится на втором и третьем уровнях (т.е. обработки и анализа данных) концептуальной модели диагностики повышенного уровня помех (смотри рисунок 3.3) [62, 72].

Стадия идентификации неисправностей минимизирует затраты на диагностический анализ величины ЭМП с помощью отбора легкодоступных (т.е. не требующих ресурсоёмких измерений) данных и в результате включения быстродействующих программных средств их анализа (методы статистической обработки данных с целью определения аномальных значений или использование предварительно настроенных ИНС). Если на стадии идентификации удалось обнаружить некие неисправности, в некоторых представляется возможным классифицировать выявленные неисправности причинам возникновения. Для ПО ИΧ ЭТОГО может потребоваться дополнительная диагностическая информация, предоставляемая (после соответствующих запросов – смотри рисунок 3.4) программным средствам диагностической ИИС, осуществляющим классификацию (метод опорных векторов, деревья принятия решений и тому подобное). На заключительном этапе обработки и анализа диагностической информации блок прогнозирования нацелен выходных на оценку характеристик диагностируемой системы, как количественных, качественных, таких, например, как необходимость и срочность ремонтновосстановительных работ [59, 61, 71].

В последующих разделах этой главы будут описаны экспериментальные исследования и их результаты, относящиеся к применению предложенного поэтапного подхода к диагностике уровня электромагнитного возмущения в автомобилях.

Идентификация уровня электромагнитных помех. В этом подразделе будет рассмотрен процесс выявления неисправностей, вызванных автомобильной электрической системой, проявляющейся форме Основной обеспокоенностью электромагнитных помех. В связи c

автомобильными ЭМП, является нежелательный создаваемый шум, автомобильными электрическими системами, частности -системой зажигания, которая вносит негативную составляющую работу электрооборудования внутри и вне автомобиля.

В главе 2 (раздел 2.5) данной диссертационной работы был проведён сравнительный анализ данных об ЭМП от системы зажигания, полученных эмпирически и с помощью математического моделирования на основе адаптированной модели Майра. Несмотря на приемлемое соответствие эмпирических и моделируемых значений, погрешность выбранной математической модели варьировалась в пределах 7%, но данная погрешность характерна для базовых параметров, а в случае нестандартных ситуаций погрешность будет возрастать.

Поэтому первым проведённым экспериментом по использованию диагностических ИИС для выявления повышенного уровня помех было исследование, имеющие те же исходные данные (экспериментальная кривая на рисунке 2.12), но целью, которого было вместо математической модели (ММ) диагностируемых системы построить интеллектуальный датчик, работа которого базируется на диагностических данных (ДД), указывающих на неприемлемый уровень ЭМП.

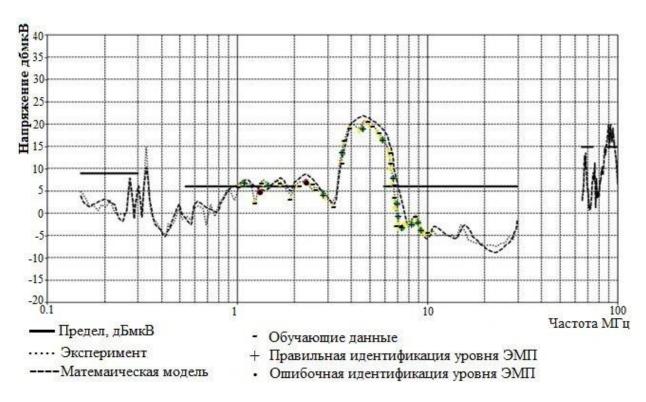


Рисунок 3.5 - Выявление уровня электромагнитных помех

Для этого был выделен частотный диапазон в пределах от 1 до 10 МГц. В выделенном диапазоне были выбраны значения, характеризующие уровень электромагнитного шума, соответствующие и несоответствующие требованиям по ЭМС (обучающие данные, выделанные жёлтым цветом на рисунке 3.5). На основании выбранных значений, процесс выбора которых описан в Приложении. Б., эти обучающие данные для интеллектуального датчика на основе ИНС были аннотированы и сохранены во входном файле.

ИНС Основной пелью использования является обеспечение автоматизированного обнаружения недопустимо высокого уровня радиопомех без априорного знания минимального соотношения (порогового значения) сигнал-шум на различных частотах. Настроив ИНС на наборе обучающих пар (80 значений), соотносящих уровень ЭМП с удовлетворением требований ЭМС в выбранном частотном диапазоне, можно ожидать, что для текущих значений шума на интересующих нас частотах ИНС будет способна идентифицировать, являются они удовлетворительными или нет.

Правильность идентификации повышенного уровня шума показана на рисунке 3.5, из которого видно, что для тестируемых данных (20 значений) факт превышения допустимого уровня ЭМП был определён правильно в 18 случаях (зелёные точки на рисунке 3.5), а ошибочно – только для двух значений (красные точки). Следует также тестовых отметить, неправильная идентификация уровня ЭМП была осуществлена для значений ЭМП, находящихся в непосредственной близости к порогу допустимости, где и моделируемые значения шума не всегда оказывались по ту же сторону порогового значения, что и экспериментальные данные. Таким образом, можно утверждать, что интеллектуальный датчик на основе ИНС способен с достаточно высокой точностью определить превышение допустимого уровня ЭМП в заданном частотном диапазоне.

Классификация причин превышения уровня излучения с помощью ИИС. Следующим за идентификацией неисправностей этапом обработки и анализа диагностических данных является классификация причин превышения уровня излучения. Диагностическая классификация проводится с целью выработки наиболее эффективных мер устранения обнаруженных неисправностей.

Для классификации причин неисправностей, связанных с уровнем ЭМП, важным шагом является определение факторов, которые играют доминирующую роль в выявлении неисправностей. Такими факторами могут быть конструктивные недоработки, дефекты материалов, нарушения технологического режима и установленных процедур контроля и испытаний.

Неисправности чаще всего возникают по техническим или организационным причинам. С целью устранения технических причин требуется изучить механизмы неисправностей или отказов от ЭМП при работе системы зажигания для последующего исключения их действия. Для устранения организационных причин нужно уточнить процедуру управления и испытания при согласовании и усовершенствовании процесса работы системы зажигания. Особое внимание при анализе отказов необходимо

уделять систематическим, или повторяющимся, неисправностям. Они возникают под воздействием сочетания неблагоприятных факторов, что усложняет выявление и устранение вызывающих их причин.

Методика анализа неисправностей и отказов предусматривает ряд последовательных действий, направленных на выявление причин и механизмов отказов. Согласно этой методике, прежде всего, проводится тщательный анализ условий возникновения отказа - при этом детально изучаются рабочие режимы диагностируемого объекта [48, 54, 79].

Основные виды отказов классифицируют:

- по характеру изменения параметров объекта постепенный или внезапный;
- по связи с отказами других объектов независимый или зависимый;
- по стадии возникновения причины отказа конструкционный, производственный или эксплуатационный;
- по устойчивости неработоспособности самоустраняющийся или перемежающийся;
- по способу обнаружения явный или скрытый отказы.

Внезапная неисправность, ЭМП, В числе связанная TOM cскачкообразным значений характеризуется изменением одного нескольких параметров объекта. Так увеличение времени накопления заряда приводит к увеличению тока разрыва, связанному с необходимостью в определенных условиях поджечь обеднённую или обогащенную рабочую смесь, что приводит к увеличению мощности разряда и, следовательно, к усилению электромагнитного возмущения. Причинами внезапных неисправностей или отказов могут быть как постепенные изменения условий работы систем зажигания, так и резкие изменения, связанные с регулярной перегрузкой системы зажигания. Характерными примерами внезапных отказов являются пропуски искрообразования, сопряженные с высоким уровнем ЭМП [48].

Категоризация неисправностей и отказов на внезапные и постепенные носит достаточно условный характер и определяется, в основном, возможностями управления параметрами объекта. Неисправность или отказ классифицируются как внезапные, в том случае, если им не предшествует направленное изменение какого-либо из наблюдаемых эксплуатационных параметров. При этом трудно прогнозировать время возникновения такого отказа. Постепенному же отказу предшествует закономерное изменение эксплуатационного параметра, что позволяет прогнозировать время его наиболее вероятного возникновения.

Отказы электронных устройств автомобиля, связные с ЭМП, возникающие в результате процессов, происходящих в их внутренней структуре и связанных с уровнем электромагнитного возмущения от системы зажигания, в настоящее время являются достаточно распространенными. Поэтому при рассмотрении причин неисправностей выхода из строя полупроводниковых устройств необходимо установить степень зависимости неисправности от уровня электромагнитного возмущения, что в свою очередь определяет выбор мер по устранению последующих отказов. В случае если степень независимости неисправности или отказа мала, то такой отказ можно считать независимым от уровня ЭМП.

По характеру устранения различают самоустраняющиеся (сбой) и перемежающиеся отказы. Самоустраняющиеся отказы могут возникать вследствие кратковременного электромагнитного воздействия на некоторое устройство, а также в результате кратковременного изменения электрических параметров его элементов [10, 70].

По степени обнаружения различают отказы:

- *явные*, которые обнаруживаются визуально или штатными методами диагностирования и контроля при подготовке устройства к использованию, а также его применении по назначению;
- *скрытые*, которые нельзя обнаружить визуально или штатными методами, но можно выявить при техническом обслуживании или с помощью

диагностирования интеллектуально-информационными системами, способными на основе критериев нарушения работоспособности объекта выяснять причину появления неисправностей, определить их характер и возможные последствия.

Конструкционные отказы и неисправности происходят в результате несовершенства или нарушения установленных правил или норм конструирования объекта. Причинами, вызывающими такие отказы, могут быть неправильная оценка возможностей устройств системы зажигания при их выборе и изготовлении, с последующим высоким уровнем эмиссии электромагнитных помех, а также ошибки при конструировании. В результате устройства СЗ могут подвергаться перегрузкам и преждевременно выходить из строя [10, 48, 70].

Производственные отказы и неисправности в работе электрооборудования автомобилей возникают вследствие несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления устройств систем зажигания, которые сопровождается высоким уровнем ЭМП и выполняется на станции технического обслуживания или специальной лаборатории.

Эксплуатационные отказы и неисправности связаны с нарушением установленных правил или условий эксплуатации объекта.

Деградационный отказ обусловлен естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости электрооборудования автомобиля при условии соблюдения всех установленных правил или норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Ресурсный отказ возникает, например, когда система зажигания начинает давать сбой из-за увеличения предельного расстояния между электродами свечи зажигания. Данное обстоятельство провоцирует увеличение уровня ЭМП из-за все более возрастающей мощности разряда в свече, а затем, когда образуется нехватка мощности, начинаются пропуски зажигания, что является серьезным отказом.

Классификация отказов имеет большое значение в практике эксплуатации электрооборудования автомобилей, так как позволяет определять причины отказа и устранять их.

Анализ неисправностей и отказов электрооборудования автомобиля, связанный с уровнем электромагнитного возмущения, показывает, что примерно 40 - 45% всех отказов происходит из-за ошибок, допущенных при конструировании, 20% - из-за ошибок в процессе производства, 30% - в результате неправильной эксплуатации, 5 -10% - вследствие естественного износа и старения [10,48, 79].

В данном исследовании рассмотрены конструкционный И эксплуатационный отказы, обусловленные наличием экспериментальных данных возникновения неисправностей, приводящих к увеличению уровня ЭМВ. В качестве конструкционного отказа рассмотрен пример ненадёжного крепление антенны к корпусу автомобиля, а в качестве эксплуатационного проблемы, недостаточной отказа возникающие из-за ёмкости помехоподавляющего конденсатора системы зажигания. Данный конденсатор свечей соединяет положительные выводы отдельных зажигания заземляющим устройством, функцию которого выполняют цилиндры двигателя. Наличие такого конденсатора должно ослаблять магнитное поле вокруг свечи, тем самым снижая уровень ЭМП. Задача диагностической классификации ставилась как анализ амплитудно-частотной характеристики соотношения сигнал-шум с целью определения:

- надёжности крепления антенны;
- степени уменьшения шума помехоподавляющим конденсатором.

Электромагнитный сигнал радиопомех — фактический уровень ЭМП, наводимый на антенну коаксиальным кабелем,— был измерен как в отсутствии помехоподавляющего конденсатора (линия, составленная из точек на рисунке 3.6), так и при подключении конденсатора емкостью 1 мкФ (пунктирная линия), а затем конденсатора 4.7 мкФ (сплошная линия на том же рисунке). Сплошные горизонтальные линии (имеющие большую толщину)

представляют собой пороговые значения шума на различных частотах, полученные из [56-59].

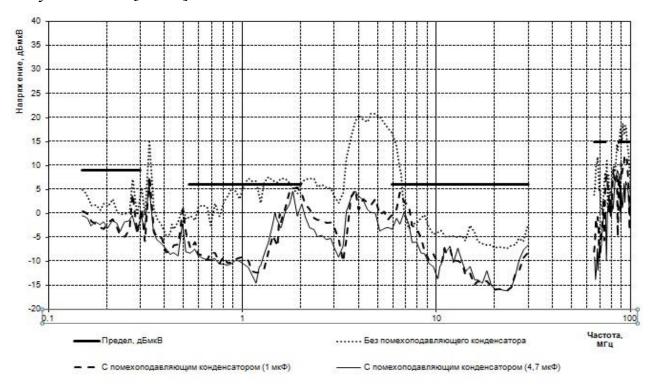


Рисунок 3.6 – Спектральные распределения напряженности ЭМП от системы зажигания

Подобные исходные данные были получены и для диагностики качества крепления антенны к корпусу автомобиля — график частотных характеристик сигнала ЭМП от СЗ для случаев надёжного и ненадёжного контакта, который приведен в разделе 3.3.

Как было указано в разделе 3.1, для реализации диагностической ИИС использовались интеллектуальные компоненты (т.е. интеллектуальные датчики), оперирующие внутри программных оболочек WEKA и ENCOG. Вычислительный эксперимент ПО использованию инструментов диагностике проводился на ноутбук Lenovov 580 с интеллектуальной двуядерным процессором Intel Core i5 3230M 2.6ГГц и 8GB оперативной памяти. Помимо основной задачи диагностики повышенного уровня ЭМП, экспериментальные исследования были направлены и на оценку пригодности методов вычислительного интеллекта для практического использования в бортовых системах диагностики автомобилей.

Рисунок 3.7 иллюстрирует возможности диагностической ИИС в определении качества крепления антенного кабеля к крыше кузова автомобиля на основе частотной характеристики сигнала радиопомех. Нижеприведённый рисунок — это по существу матрица неточностей классификаторов ВЕКА: синие "крестики" в левом нижнем углу представляют случаи правильного определения надежного крепления антенны к кузову автомобиля (надёжный контакт —699 из 801 точек данных) лучшим классификационным алгоритмом в оболочке WEKA с интеллектуальным датчиком на основе алгоритма J-48 (реализующим деревья принятия решений). Красные "крестики" в верхнем правом углу показывают правильно определенные случаи (700 из 801) выявления ненадежных контактов; «кружки» (синие и красные) в двух оставшихся углах рисунка символизируют неправильно классифицированные (102 и 100 из 801 соответственно) диагностические данные.



Рисунок 3.7 - Классификация надёжности заземления антенного кабеля к кузову автомобиля

Для сравнения точности классификационных алгоритмов (интеллектуальных датчиков) в программной оболочке ВЕКА, были

проведены сто повторных запусков каждого алгоритма, а результаты их работы были усреднены и приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Погрешность классификационных датчиков надёжности заземления антенного кабеля.

| Алгоритмы, реализуемые | | Результаты | | | |
|------------------------|---------------------------|-----------------|------------------------------------|-------------|--|
| | уальными и диагностики | Погрешность (%) | Среднеквадратическое отклонение | р-значение | |
| Zero-R | | 50.06 | 0.12 | | |
| One-R | | 25.68 | 3.23 | неприемлемо | |
| J-48 | | 12.57 | 2.70 | | |
| Метод | Классификация | 8.49 | неприемлемо | <0.01 | |
| векторов | Регрессия | 5.95 | | 0 | |

Интеллектуальный диагностический датчик, реализующий метод опорных векторов (МОВ) с помощью программной оболочки ENCOG, был задействован в двух режимах:

- в режиме *классификации*, обеспечивающий двоичный выход (то есть надежность или ненадежность контакта антенны с корпусом), что повышает быстродействие ИД;
- в режиме *регрессии*, при котором на выходе датчика предоставляются непрерывные значения (в диапазоне от 0 то 1), что позволяет повысить точность классификации путём сравнения выходного значения с пороговым (в данном случае равным 0.5).

К преимуществам же классификационного режима работы интеллектуального диагностического датчика, реализующего МОВ, можно отнести его относительное быстродействие.

Как видно из таблицы 3.1, точность интеллектуального датчика на основе МОВ существенно превосходит точность его аналогов, исполненных в оболочке ВЕКА. Уровень значимости (*p* - значение) был рассчитан с

использованием пакета R для статистических вычислений и показал, что метод опорных векторов достоверно (с вероятностью ошибки меньше 1%) обеспечивает лучшие возможности классификации. Таким образом, в практических целях имеет смысл использовать МОВ для диагностики повышенного уровня ЭМП из-за неисправностей в установке антенны [59].

Аналогичные эксперименты были проведены и для второго сценария наличия неисправностей, приводящих к повышению уровня ЭМВ – а именно, к недостаточной ёмкости помехоподавляющего конденсатора в системе зажигания. Для проведения диагностики использовались исходные данные, полученные из частотных характеристик, представленных на рисунке 3.6. Как и в первом сценарии, разброс значений матрицы неточностей для лучшего классификационного датчика в программной оболочке ВЕКА (J-48) показан на рисунке 3.8.

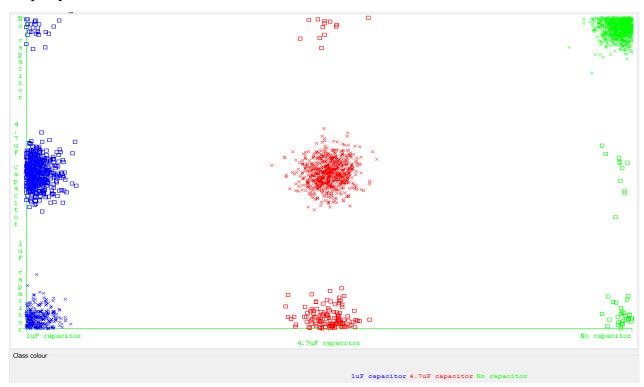


Рисунок 3.8 - Классификация уровня электромагнитной эмиссии в зависимости от ёмкости демпферного конденсатора C3

Подобно предыдущему сценарию, в левом нижнем углу на рисунке 3.8 сгруппированы синие "крестики", правильно классифицирующие наличие помехоподавляющего конденсатора 1мкФ (300 из 801 точек данных). Кластер

красных "крестиков" в середине рисунка соответствует правильному определению ёмкости помехоподавляющего конденсатора на 4,7 мкФ (663 из 801). Зеленые "крестики" в правом верхнем углу рисунка указывают на отсутствие помехоподавляющего конденсатора (интеллектуальный датчик правильно распознал этот вариант в 760 случаях из 801). Разноцветные «кружки» (синие, красные и зелёные), находящиеся не на главной диагонали рисунка соответствуют неправильно классифицированным диагностическим данным.

Погрешность классификации интеллектуального датчика, основанного на методе опорных векторов, реализованного в среде ENCOG, выше по сравнению с J-48 и достигает 13.08% (см. Таблицу 3.2).

Таблица 3.2 - Классификация уровня электромагнитной эмиссии в

зависимости от ёмкости помехоподавляющего конденсатора СЗ

| Алгоритмы, реализуемые интеллектуальными датчиками диагностики ЭМП | | Результаты | | | | |
|--|---------------|-----------------|------------------------------------|-------------|--|--|
| | | Погрешность (%) | Среднеквадратическое отклонение | р-значение | | |
| Zero-R | | 66.7 | 0.06 | | | |
| One-R | | 51.5 | 3.02 | неприемлемо | | |
| J-48 | | 28.16 | 2.59 | | | |
| Метод опорных векторов | Классификация | 13.9 | WOMBYO WOO | <0.01 | | |
| | Регрессия | 13.08 | неприемлемо | <0.01 | | |

Классификационные возможности диагностического датчика, реализующего метод опорных векторов и различающего три уровня подавления ЭМП, соответствующих различным емкостям помехоподавляющего конденсатора (0 мкФ (отсутствие конденсатора), 1 мкФ и 4,7 мкФ соответственно), продемонстрированы на рисунке 3.9.

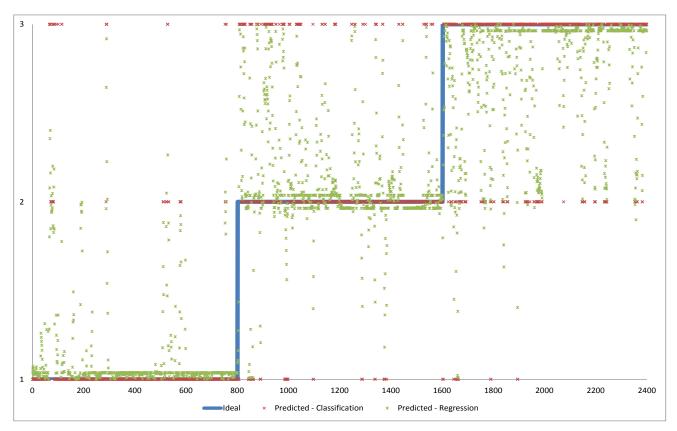


Рисунок 3.9 - Классификационный и регрессионный режимы работы ИД на базе МОВ

Красные точки представляют работу МОВ в классификационном режиме, в то время как зеленые точки иллюстрируют распределение выходных значений интеллектуального датчика, реализующего работу МОВ в режиме регрессии. В идеальном случае красные и зелёные точки должны формировать график трёхступенчатой функции, где каждая ИЗ горизонтальных ступенек представляет правильно классифицированное значение ёмкости помехоподавляющего конденсатора (0, 1 и 4,7 мкФ соответственно). В реальном же случае мы видим, что красные точки (классификационный режим работы МОВ) распределены по всей длине горизонтальных прямых – те красные точки, которые выходят за зону соответствующих ступенек, представляют случаи ошибочной классификации.

Зелёные точки распределены не только вдоль горизонтальной, но и вдоль вертикальной оси, что демонстрирует непрерывный характер выходных значений МОВ, который работает в режиме регрессии. При соотнесении каждой зелёной точки регрессионного МОВ с ближайшим горизонтальным

уровнем трёхступенчатого графика, можно повысить классификационную точность диагностики значения ёмкости помехоподавляющего конденсатора.

Один из выводов, который можно сделать на основе рисунка 3.9, заключается в том, что интеллектуальный датчик достаточно надёжно определяет отсутствие помехоподавляющего конденсатора (нижний левый угол рисунка), что оказывает существенное влияние на уровень ЭМП от системы зажигания. Провести различие между случаями наличия конденсаторов разной ёмкости (1 и 4,7 мк Φ) представляется более тем не менее, возможным, что подтверждает проблематичным, но, классификационный потенциал программных средств диагностики на основе вычислительного интеллекта.

Заданный уровень ошибки в 15% (предустановленный параметр в программной оболочке ENCOG) был достигнут на первой итерации, демонстрируя тем самым эффективность обучения МОВ. Требование уменьшить ошибку классификации до 10%, приводит к резкому увеличению необходимого времени обучения — десять минут на ноутбуке Lenovo 580с, используемом для выполнения экспериментов. Однако это ограничение не предотвращает использование интеллектуальных датчиков, так как, проведя обучение один раз, подобные классификаторы способны определять наиболее вероятную причину повышенного уровня ЭМП практически мгновенно на основе диагностических данных. Переобучение, и, следовательно, временная задержка на его реализацию, потребуется только при существенном изменении режима работы диагностируемой системы.

Прогнозирование уровня электромагнитных помех. Выявив высокий уровень ЭМП, и разобравшись в возможных причинах его возникновения, для некоторых практических задач может представляться интересным прогнозирование уровня электромагнитных помех в сложившихся условиях функционирования. Наиболее очевидной целью стадии прогнозирования в процессе диагностики является определение необходимости и оценки сроков проведения ремонтных работ [59, 61].

В данном исследовании, нацеленном на диагностику уровня ЭМП от системы зажигания двигателя, задачей прогнозирования было восполнение знаний о предельно допустимых значениях уровня ЭМП (или «Оценки допущений» на слое «Интерпретации данных» – смотри концептуальную диагностическую модель на рисунке 3.3). Исходные диагностические данные (приведённые на рисунке 3.6) определяют пороговые значения шума не для всех частот внутри интересующего нас частотного интервала, что ставит задачу их интерполяции.

Для решения этой задачи был также задействован интеллектуальный датчик, осуществляющий классификацию диагностических данных на основе метода опорных векторов, реализованного в программной оболочке ENCOG. Результаты прогнозирования представлены на рисунке 3.10, левая половина которого (рисунок3.10(а)) сравнивает значения спрогнозированных порогов ЭМП с их реальными значениями для случаев, когда они известны.

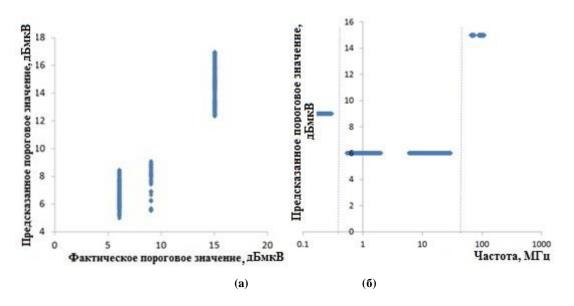


Рисунок 3.10 - Прогнозирование уровня эмиссии и соответствующих частот

Пороговое значение в 15 дБмкВ всегда классифицировалось безошибочно предложенным интеллектуальным датчиком (800 тестовых случаев), в то время как при попытке различить пороговые значения в 6 или 9 дБмкВ были допущены ошибки классификации (60 тестовых случаев из 800).

График (б) на правой половине рисунка 3.10, соотносит спрогнозированные значения предельно допустимых ЭМП с частотными диапазонами, на которых данные эти ЭМП действуют. При этом частотами, на которых следует изменять оценку порогового значения радиопомех, являются 0,416 МГц (предельный уровень шума уменьшается с 9 до 6 дБмкВ) и 47.3 МГц (предел шума увеличивается с 6 до 15 дБмкВ).

Эти результаты можно рассматриваться как своего рода знания, приобретённые в ходе обработки и анализа измерительных данных, которые могут оказаться полезными при автоматической настройке, предлагаемой ИИС для диагностики уровня ЭМП. Пример подобной диагностики приведен в следующем разделе.

3.3 Экспериментальное исследование на базе интеллектуальноинформационных систем

Для подтверждения разработанного алгоритма проводились экспериментальные исследования, в качестве объекта которого выступала система зажигания, а само исследование было направлено на диагностику уровня ЭМП в зависимости от качества заземления автомобильной антенны. Правильная установка антенны на автомобиле определяет дальность связи и качество принимаемого сигнала.

Уровень ЭМП от системы зажигания двигателя серьезно влияет на чувствительность радиостанции автомобиля, поэтому в современных автомобилях антенна располагается на наибольшем возможном удалении от двигателя, а питание радиостанции автомобиля осуществляется через фильтр или непосредственно от аккумуляторной батареи. При этом важно, чтобы уровень ЭМП в приемнике радио- и видеосигналов при отключенной антенне либо не изменялся вообще, либо изменялся незначительно после включения двигателя. Это означает, что по цепям питания помехи проникать не должны.

В большинстве современных автомобильных станций используются фильтры по питанию, которые нужны для дополнительного уменьшения ЭМП.

К автомобильной антенне предъявляются настолько жесткие требования по механическим, электрическим, эстетическим и эксплуатационным параметрам, что подавляющее большинство автомобилистов используют антенны промышленного изготовления. Все типы автомобильных антенн относятся к классу антенн типа *Ground plane* – в такой антенне роль заземляющей поверхности выполняет металлический кузов автомобиля.

Наилучшие результаты по дальности связи дает полноразмерная антенна длиной 0.25λ (четверть длины волны), однако такая длинная антенна (2,75 м) является чрезвычайно громоздкой и неудобна в эксплуатации. По этой причине производители антенн используют различные методы их укорочения (согласующая индуктивность в основании штыря, в середине его или распределенная по всей длине антенны). Это позволяет уменьшить длину антенны, сопоставимую по характеристикам с полноразмерной штыревой антенной; тем не менее, для укороченных антенн остается справедливым тот факт, что увеличение длины антенны улучшает ее эффективность [44, 68].

Автомобильная антенна должна быть настроена в резонанс на средней частоте диапазона, что с одной стороны позволяет ей улучшить качество приема, а с другой стороны настроить функцию уменьшения уровня ЭМП от системы зажигания. Различные модели антенн настраиваются разными способами, причем в большинстве случаев настройка в резонанс достигается регулировкой длины штыревой антенны, что также позволяет уменьшить ЭМП и улучшить качество приема теле и аудио сигналов.

Устанавливается антенна на автомобиле в наибольшем удалении от основного электрооборудования (стартер, система зажигания), так как в ином случае электромагнитные помехи, наводимые от неё, будут максимальными.

Для уменьшения уровня ЭМП автомобильная антенна устанавливается в середине крыши и тогда диаграмма направленности приближается к круговой. Причем, для достижения успешной работы, штыревая антенна

согласовывается с линией питания и настраивается в резонанс с излучаемым ей сигналом.

Для уменьшения уровня электромагнитных помех (ЭМП) необходимо непременное соблюдение основного принципа для любого типа антенн: надежный контакт антенны с кузовом, отсутствие ненадежных контактов в заделке коаксиального кабеля в разъемы, в том числе в разъемах и подпружиненных контактах [47, 57].

Теоретические расчеты показывают, что наибольший уровень ЭМП имеют место в зоне с радиусом 0,3-0,4 длины волны, поэтому в этой зоне проводится заземление, то есть соединяются между собой радиальные провода. Это дает возможность уравнять потенциалы контактного кабеля антенны и кузова максимально близко, что приведет к уменьшению сопротивления заземления и, вследствие этого, увеличит эффективность работы антенны, расширив ее широкополосность. Особенно это важно для укороченных антенн. [47, 57]

Важно также учитывать, что при работающем двигателе внутреннего сгорания самым сильным источником помех в автомобиле являются помехи от системы зажигания. Как было отмечено в Главе 1, при исследовании данной проблемы была проведена большая работа, направленная на анализ нагрузки свечи зажигания и сопутствующие этому помехи, которые в значительной степени зависят от надежности электрического заземления антенного кабеля к крыше автомобиля. Однако, тесты на ЭМС, проводимые в соответствии с международными стандартами, дорогостоящие и ресурсоёмкие, что выносит вопрос надежного заземления антенны в разряд актуальных задач [47, 57].

Обеспечение требований по ЭМС тесно связано с качеством заземления, особенно с точки зрения плохого контакта или отсутствия такового. При этом следует уточнить, что качество заземления напрямую определяется надежным контактом антенного кабеля и корпуса автомобиля выполняющего функции заземляющего устройства. На рисунке 3.11[50] показано напряжение широкополосных радиопомех на выходе антенного кабеля автомобиля в

зависимости от качества контакта, где линия 1 соответствует плохому контакту ($R_{nepex} > 0.05$ Ом и $R_{3a3em} > 2$ Ом) кабеля с крышей автомобиля, а линия 2 – хорошему контакту ($R_{nepex} < 0.05$ Ом и $R_{3a3em} < 2$ Ом).

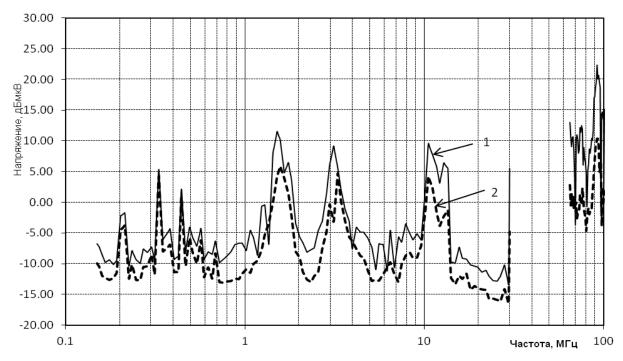


Рисунок 3.11 - Напряжение широкополосных радиопомех на выходе антенного кабеля автомобиля

На рисунках 3.12 и 3.13 [50] показаны зависимости напряжения широкополосных радиопомех от частоты для производителей разных антенных кабелей. При этом видно, что от качества контакта антенного кабеля с кузовом автомобиля зависит уровень помех, так как на всем диапазоне частот (смотри рисунок 3.12) у разных производителей уровень помех различается в среднем до двух раз. При этом уровень помех не превышает предельных значений ни у одного из производителей на всём диапазоне. Кроме того, в диапазоне длинных волн, показанном на рисунке 3.12, уровни помех практически не отличаются, а в диапазонах средних и коротких волн уровень помех отличается примерно в 2 раза.

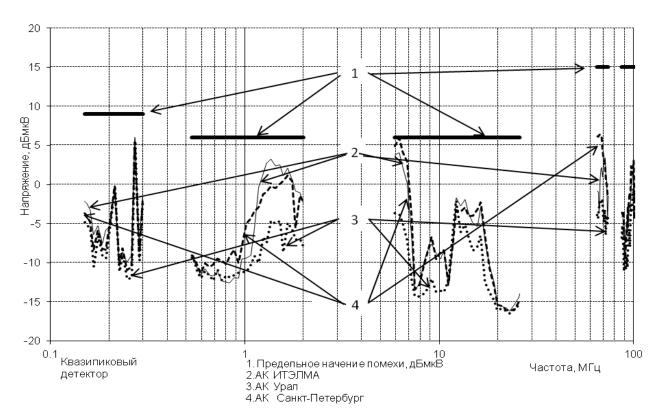


Рисунок 3.12 - Напряжение широкополосных радиопомех на выходе антенного кабеля автомобиля LADA 11194

На рисунке 3.13 более детально показан диапазон высоких частот, наиболее важный с точки зрения ЭМС электрооборудования автомобилей, который был взят из рисунка 3.12, где он сдвинут вправо и поэтому плохо просматривается. Как видно из рисунка 3.13, на ультракоротком диапазоне частот, разбитом на два участка от 65 до 74 МГц и от 87 до 108 МГц, напряжение ЭМП для антенных кабелей у разных производителей примерно в 2 раза отличаются по уровню помех. Это свидетельствует о важности качественного заземления. При этом уровень помех в среднем в 4 раза ниже нормы для всех типов антенных кабелей [57].

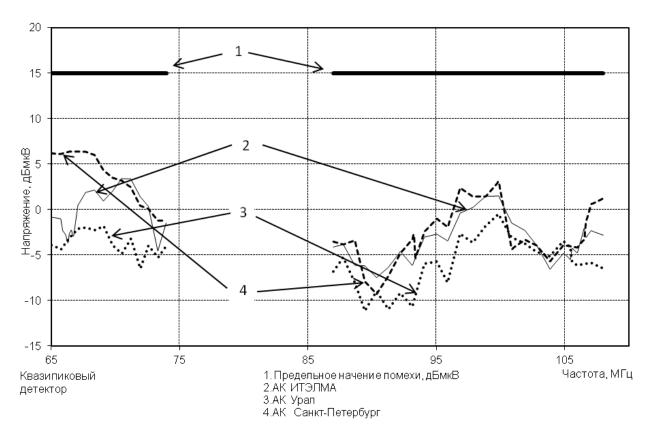


Рисунок 3.13 - Напряжение широкополосных радиопомех на выходе антенного кабеля автомобиля LADA 11194 (ультракороткий диапазон частот).

Тестируемые интеллектуально-информационной системой антенные кабели разных производителей (Урал, ИТЕЛМА, Санкт-Петербург) имеют разную контактную площадку, что имеет кардинальное значение, так как в зависимости от качества контакта ($R_{\text{перех}}$ <0.05 Ом и $R_{\text{зазем}}$ < 2 Ом) изменяется качество приема радио- и телевизионных сигналов и уменьшается уровень ЭМП, наводимых на антенну [7, 27, 57].

В данном разделе подтверждается, что надежный контакт антенного кабеля с кузовом автомобиля, выступающем в роли заземляющего устройства, значительно снижает уровень помех от электрооборудования автомобиля. В результате становится очевидным, что чем лучше качество контакта ($R_{\text{зазем}}$) антенного кабеля с кузовом автомобиля, тем выше качество сигнала и дальность его приема.

Со временем качество заземления может ухудшиться, что потребует своевременной диагностики повышения уровня электромагнитных помех, который чаще всего связан с ухудшением заземления, хотя это не

единственный фактор, ухудшающий электромагнитную совместимость. По этой причине, как уже было показано в данной главе, при повышении уровня ЭМП целесообразно использование интеллектуальной информационной системы (ИИС). ИИС может самостоятельно диагностировать нарушение требований по ЭМС, а затем и способствовать уменьшению уровня помех рекомендации изменения таких посредством параметров время как заряда, величину помехоподавляющего конденсатора или накопления сопротивления (резистора) цепи системы зажигания. В случае механического повреждения заземления ИИС подает сигнал на электронный блок управления ДВС, а через него оповещает водителя о неисправности.

3.4 Выводы по главе

- 1. Разработан комплексный подход, заключающийся в систематизировании процесса сбора, обработки, анализа и интерпретации данных, осуществляемого для каждой стадии диагностики неисправностей, а именно идентификации и классификации неисправностей, а также прогнозирования их эффекта на функционирование исследуемой системы, проведённых для обеспечения электромагнитной совместимости системы зажигания ДВС.
- 2. Проведено исследование работы интеллектуальных датчиков на основе искусственных нейронных сетей и метода опорных векторов, в процессе которого было показано, что они способны с достаточно высокой степенью точности (~90%) идентифицировать предельный уровень ЭМП. Данный факт позволяет эффективно использовать предложенный диагностический метод в случаях, когда математическая модель процесса либо неизвестна, либо очень сложна.
- 3. Предложена интеллектуально-информационная система, которая позволяет классифицировать наиболее вероятные причины возникновения электромагнитных помех, с точностью около 90%, что было выявлено на

примере определения надёжности крепления антенны к кузову автомобиля (точность классификации ~94%) и значения ёмкости помехоподавляющего конденсатора (точность классификации ~87%).

- 4. Продемонстрированы возможности реализованной ИИС в отношении интерпретации диагностических данных для прогнозирования пороговых значений ЭМП в широком диапазоне частот. На практике это может позволить бортовым диагностическим системам автоматически определять уровень ЭМП для текущего режима работы двигателя, что также проявляет интеллектуальные возможности предложенной ИИС для диагностики проблем с ЭМС системы зажигания.
- 5. Проведены экспериментальные исследования, которые показали, что использование интеллектуально-информационной системы может самостоятельно диагностировать нарушение ЭМС, а затем и способствовать уменьшению уровень помех, изменяя посредством исполнительных механизмов такие параметры как время накопления заряда, величину помехоподавляющего конденсатора или сопротивления (резистора) в цепи системы зажигания.

Глава 4 РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ В СОСТАВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ

Как было отмечено во вводной главе, наряду с теоретическими математическими моделями, использующими подход математического моделирования (смотри раздел 1.7) при диагностике и функциональном прогнозировании технических систем, в частности системы зажигания ДВС автомобиля, рассмотренных в Главе 2 данной диссертационной работы, широко применяются экспериментальные факторные модели. Данные модели базируются на измерительных данных и осуществляют имитационное моделирование процессов функционирования технических систем. В предыдущей главе были описаны примеры таких экспериментальных моделей в форме интеллектуальных датчиков и построенных на их основе интеллектуально-информационных систем (ИИС) диагностики параметров ЭМС автомобильного электрооборудования.

В основе ИИС лежит информация, следствием нематериальной природы которой является возможность её неограниченного тиражирования и универсальность применения [2]. Диагностические данные, получаемые в процессе функционирования технических систем, можно рассматривать в качестве информационных ресурсов, выявляющие характерные признаки знание которых необходимо для эффективного контроля Современный подход к решению управления. задач, описываемых количественными и качественными признаками с преобладанием последних, в силу чего относящимся к слабоструктурированным, базируется на методах искусственного интеллекта [105].

Знания, накопленные и хранящиеся в интеллектуальноинформационной системе, включают в себя фактуальное (предметное) знание и алгоритмическое (процедурное) знание. Фактуальное знание — это совокупность сведений о качественных и количественных характеристиках конкретных объектов. Характеристические карты, получаемые в процессе испытаний двигателей и несущие информацию о показателях работы ДВС в зависимости от скорости вращения коленчатого вала, угла открытия дроссельной заслонки, УОЗ, состава рабочей смеси и тому подобное (смотри рисунки 1.4 – 1.7), можно считать показательным примером актуальных знаний в исследуемой предметной области [61, 65, 72].

Алгоритмическое знание представляет собой совокупность алгоритмов и портативных (то есть способных переноситься с одних систем на другие без существенных модификаций) программ. Такую реализацию алгоритмических знаний называют программным продуктом, а наиболее распространенные его формы — это пакеты прикладных программ, ориентированные на конкретную область применения ИИС. Основные классы таких программ будут описаны в следующем разделе.

4.1Классификация интеллектуально-информационных систем

Таким образом, интеллектуально-информационная система (ИИС) основана на концепции использования имеющихся информационных ресурсов и знаний для построения алгоритмов решения прикладных задач. Для ИИС характерны следующие признаки [72]:

- интерфейс пользователя с расширенными возможностями;
- способность решать слабоструктурированные задачи;
- возможность самообучения;
- адаптивность.

Реализуемые на практике ИИС могут обладать несколькими признаками интеллектуальности с различной степенью проявления. В качестве решения задачи определения ЭМС автомобильного электрооборудования представляют интерес следующие направления развития интеллектуальных функций.

Интеллектуальный интерфейс пользователя. Основная задача интеллектуального интерфейса пользователя (ИИП) – это обеспечить информативный диалог с пользователем в удобном для него формате. Для этой цели могут использоваться естественно-языковой интерфейс с голосовым вводом команд в систему управления двигателем, интерфейсы контекстной требуемой помощи, подсказывающие пользователю схемы поиска информации, и интерфейсы когнитивной графики, позволяющие в наглядном И выразительном виде визуализировать множество параметров, характеризующих изучаемый процесс [2].

В силу специфичности данной работы вышеперечисленные функциональные возможности ИИП не рассматриваются, а основное внимание уделяется интеллектуальной обработке диагностических данных, обеспечивающей выборку необходимой информации, не присутствующей в явном виде. В ходе данной выборки диагностической информации ЭБУ двигателя может осуществлять мониторинг сложившейся по ЭМС ситуации и формировать управляющие сигналы.

Экспертные системы. Экспертные системы (ЭС) применяются для решения нечётко формализованных проблем, к которым принадлежат задачи, характеризуемые следующими факторами [43]:

- задачи не допускают представления в чисто числовой форме;
- неточность или неоднозначность исходных данных и представлений об изучаемом процессе;
- неопределённость целевой функции;
- отсутствие или невозможность реализации (в силу большой размерности пространства решений или ограниченности ресурсов) однозначного алгоритмического решения задачи.

Основополагающим отличием ИИС на базе ЭС от традиционных систем обработки данных является символьный (а не числовой) способ представления данных и использование процедур логического вывода и эвристического поиска решений. Выделяются четыре основных класса ЭС [2]:

- классифицирующие ЭС, направленные на распознавание ситуаций (в частности, недопустимого уровня ЭМП);
- доопределяющие ЭС, оперирующие с неполно определёнными, неточными или противоречивыми данными;
- трансформирующие ЭС, осуществляющие преобразование имеющихся знаний об исследуемой системе или процессе в ходе решения поставленных задач;
- мультиагентные ЭС, интегрирующие разнородные информационные ресурсы и источники знаний.

В рамках данной работы наибольший интерес представляют классифицирующие функции ИИС на базе ЭС, позволяющие построить интеллектуальные датчики, распознающие причины превышения ЭМП предельно допустимого уровня от системы зажигания. В качестве примера такого датчика можно привести эмпирический классификатор, применяющий метод опорных векторов, описанный далее. Распознаваемыми причинами повышенного уровня помех тогда выступали отсутствие или недостаточная ёмкость помехоподавляющего конденсатора, неэффективное заземление корпуса автомобиля, внешние возмущения и тому подобное.

Самообучающиеся системы. Самообучающиеся ИИС используют методы автоматической классификации режимов функционирования изучаемой системы (например, нормальный и абнормальный режим работы системы зажигания ДВС с точки зрения генерируемых ЭМП) или методы обучения на примерах. При этом примеры могут представлять собой обучающие выборки диагностических данных, отражающие значения классификационных признаков.

Стратегия обучения на примерах предполагает возможность пометки каждой обучающей выборки символьным значением, показывающим принадлежность выборки к определённому режиму работы системы. При классификации, проводимой автоматически, ИИС должна самостоятельно

выделять классы ситуаций по степени близости значений классификационных признаков.

В процессе самообучения ИИС происходит автоматическое выявление обобщающих правил, описывающих принадлежность выборки ситуационным классам (например, соответствующим различным диагностическим выводам), которыми ИИС впоследствии будет пользоваться при интерпретации незнакомых ситуаций. Эти обобщённые правила формируют базу знаний, которая с определённой периодичностью корректируется с целью интегрирования накапливаемой информации об изучаемой системе или процессе.

Различают следующие типы самообучающийся ИИС [2]:

- 1. Индуктивные ИИС с самообучением позволяют обобщать частные примеры для формирования общих классов по значимым классификационным признакам. Этот тип ИИС оперирует на достаточно высоком уровне абстракции, и в данной работе рассматриваться не будет.
- 2. Искусственные нейронные сети (ИНС), описанные в разделе 1.8 представляют собой классический пример экземпляр методики самообучения, основанной на примерах. Благодаря этой их способности, ИНС используются при решении задач обработки сигналов, распознавания образов и прогнозирования, что облегчает их применимость для идентификации возможных проблем с ЭМС электрооборудования автомобиля на основе диагностических данных.
- 3. В самообучающихся ИИС, основанных на прецедентах, базы знаний описывают произошедшие в прошлом ситуации, или прецеденты, приведшие к тем или иным последствиям. Поиск решений осуществляется на основе аналогий, и в отличии индуктивных ИИС с самообучением допускается уровень неопределённости с получением множества возможных альтернатив, характеризуемых коэффициентом уверенности. Наиболее подходящие решения с высоким коэффициентом уверенности адаптируется к новым ситуациям, что позволяет прогнозировать поведение изучаемой системы или

процесса — в частности, уровень ЭМП, генерируемых системой зажигания ДВС в заданном режиме работы.

Целесообразность использования таких самообучающихся систем, тем не менее, напрямую связана с размером накопленных баз знаний и не является очевидной применительно к данной диссертационной работе.

4. К самообучающимся ИИС также можно отнести информационные хранилища, содержащие значимую информацию, регулярно дополняемую из оперативных баз данных и применяемую для поддержки принятия решений [10]. Для извлечения требуемой информации ИИС такого рода применяется технология оперативного анализа данных (OLAP)и средства добычи знаний Mining), основанные на применении методов математической статистики, ИНС, построения деревьев решений и некоторых других. В силу относительно малого объёма измерительных данных, используемых диагностической ИИС электромагнитной совместимости автомобильного электрооборудования, включение в неё информационного хранилища также не является целесообразным.

Адаптивные системы с машинным обучением. Потребность в адаптивных ИИС возникает в тех случаях, когда сами области их применения претерпевают обновление, развитие или динамические изменения. В связи с этим на адаптивные ИИС накладываются специфические требования, такие как:

- адекватное отражение накопленных знаний в предметной области и текущего состояния исследуемой системы в каждый момент времени;
- архитектурная гибкость и возможность настройки под постоянно изменяющуюся задачу моделирования динамических процессов.

Адаптивные свойства ИИС обеспечиваются с помощью интеллектуализации их архитектуры, используя, например, компонентные технологии, и с помощью настройки программного обеспечения ИИС, применяя в частности методы машинного обучения. В контексте данной

работы адаптивность разрабатываемой ИИС достигается в результате наличия нескольких интеллектуальных датчиков, активизируемых на разных стадиях диагностического процесса и выступающих в роли взаимозаменяемых и дополняющих друг друга компонентов диагностической ИИС.

Кроме того, программное обеспечение каждого ИД может настраиваться в соответствии с получаемыми диагностическими данными с помощью методов машинного обучения – в частности, генетических алгоритмов.

В следующем разделе будет предложена к рассмотрению архитектура интеллектуального диагностического комплекса, объединяющего несколько разновидностей вышеописанных ИИС для мониторинга ЭМС электрооборудования автомобиля. Структурные блоки этого комплекса показаны на рисунке 4.1 и базируются на адаптированной классификации ИИС, приведённой в [2].



Рисунок 4.1 - Классификация ИИС применительно к процессу диагностики ЭМП Как вышеприведённого отобранные ИИС. видно рисунка, ИЗ формирующие структурную схему диагностического комплекса, упорядочены образом, чтобы выстроить виртуальный обработки таким канал

измерительных данных. Этот виртуальный канал соответствует поэтапному системному подходу к диагностике уровня ЭМП, описанному в разделе 3.2 и проиллюстрированному на рисунке 3.4. Входные данные отбираются или фильтруются интеллектуальным интерфейсом пользователя, тем самым преобразуя их в формат удобный для ИД, осуществляющих идентификацию неисправностей, связанных с ЭМС электрооборудования, классификации этих неисправностей и с прогнозированием их возможных последствий.

Далее следует более конкретизированное описание структурных элементов интеллектуального комплекса диагностики ЭМС и взаимодействия между ними.

4.2Архитектура и функциональные возможности интеллектуального диагностического комплекса

Как показано в предыдущих главах, задача разработки интеллектуальных систем для оценки ЭМС электрооборудования с автоматическим обнаружением и идентификацией уровня ЭМП является актуальной.

Концептуальные основы экспериментального моделирования позволяют решать данный класс задач без необходимости прибегать к более строгому математическому моделированию электромагнитных помех, трудно осуществимому на практике, а экспериментальные результаты, приведённые в предыдущей главе, демонстрируют эффективность предложенного подхода, базирующегося на экспериментальных данных.

Более того, интеллектуализация датчиков, обрабатывающих диагностические данные, позволяет использовать не только прямые, но и косвенные измерения признаков, характеризующих ЭМС. Напомним, что при косвенных измерениях интересующая нас величина X определяется на основании определённой зависимости между ней и факторами, значения которых находят прямыми измерениями. Таким образом, значение искомой

величины, количественной или качественной, находится опосредованно как $X = F(\overline{M})$, где F — некая функциональная зависимость, $M = (M_1, M_2, ... M_n)$ и $M_i, i \subset \overline{1,n}$ — значения величин, полученных прямыми измерениями. Интеллектуальные датчики (ИД) позволяют определить зависимость F экспериментально и динамически её настраивать при изменении окружающей среды, режимов работы и динамических характеристик изучаемой системы (например, системы зажигания ДВС). Такие экспериментальные модели в виде искусственной нейронной сети и набора опорных векторов были продемонстрированы в предыдущей главе.

Обобщая функциональные возможности уже рассмотренных ИД, а затем, объединяя их с адаптивными и самообучающимися свойствами ИИС, в ходе проведённой исследовательской работы был предложен и программно реализован прототип интеллектуального диагностического комплекса для оценки ЭМС автомобильного электрооборудования с системой зажигания ДВС, функциональная схема которого показана на рисунке 4.2.

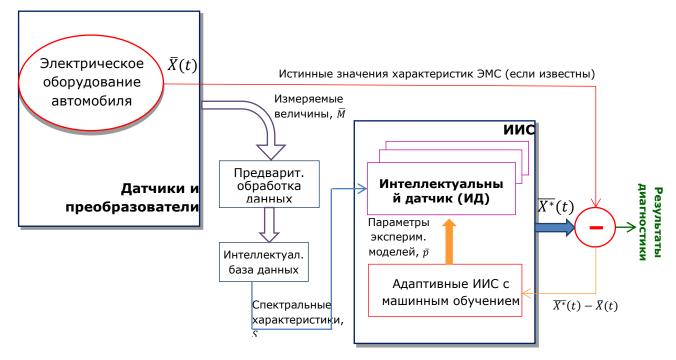


Рисунок 4.2 - Структурная схема интеллектуального диагностического комплекса

Основной задачей построения интеллектуального диагностического комплекса (ИДК) является выбор критериев селекции интеллектуальных датчиков, то есть эмпирических моделей исследуемой системы, входящих в

его состав. Если между входами и выходами изучаемой системы имеется функциональная зависимость $F(\overline{M})$ и измерения M_i , $i \subset \overline{1,n}$ проводятся точно, то для моделирования применим любой критерий, характеризующий степень соответствия смоделированных и наблюдаемых данных. В тех же случаях, когда хотя бы одно из указанных условий не выполнено, выбор критериев, соответствующих целям моделирования, становится одним из решающих факторов, определяющих его успех [1, 29, 105].

Решение таких задач как исследование влияния работы системы зажигания на электрооборудование автомобиля с целью определения электромагнитной совместимости, становится возможным благодаря отбору наиболее систематическому ТОЧНЫХ эмпирических моделей, представленных в форме ИД, и применению метода группового учёта аргументов (МГУА), реализующему принципы интеллектуализации баз данных и самообучения компонентов ИДК, и проводимых им процессов.

В отличие от существующих применений МГУА, оперирующих в основном регрессионными статистическими моделями, предлагаемый ИДК расширяет область применения метода и открывает новый класс эмпирических моделей, представленных в виде программ интеллектуальной обработки диагностических данных, то есть интеллектуальных датчиков.

Возвращаясь к рисунку 4.2, следует отметить, что ядром ИДК является совокупность ИД, выбор и настройка которых осуществляется на основе адаптации к поступающим диагностическим данным и машинного обучения. Далее следует более детальное описание компонентов, входящих в состав ИДК.

Предварительная обработка данных. В процессе предварительной обработки производится форматирование и структуризация диагностических данных как часть построения интеллектуального интерфейса пользователя. В контексте данной работы предварительная обработка данных сводится к следующим двум процедурам:

- разделение диагностических данных на две группы одна группа используется для обучения ИД, подвергаемых процессу обучения «с учителем», а вторая группа требуется для тестирования соответствия построенных в виде ИД эмпирических моделей всей совокупности диагностических данных;
- первой группы маркирование данных – так называемых обучающих соответствии пар В cимеющимися знаниями функционировании исследуемой системы; при исследовании вопросов ЭМС электрооборудования автомобиля, диагностические данные, характеризующие недопустимый уровень ЭМП, выявляются, определённым образом помечаются и включаются в набор обучающих пар 2 .

Диагностические данные на этапе предварительной обработки могут проходить процедуру дискретизации, то есть перевода из количественных в качественные оценки, а также трансформироваться в формате представления — например, временная зависимость сигнала может преобразовываться в амплитудно-частотную характеристику. В силу спецификации имеющихся диагностических данных, представленных в главах 2 и 3, процедуры дискретизации и форматирования опускаются в рамках проводимого исследования.

Интеллектуализация баз диагностических данных (уровень *обработки данных* концептуальной модели смотри рисунок 3.3). Проведя предварительную обработку диагностических данных, можно приступать к непосредственной интеллектуализации баз знаний, обеспечивающей внутри ИИП выборку значимой информации, часто не присутствующей в явном виде. Для этого проводится отбор данных, полученных в результате прямых измерений (величины M_i , $i \subset \overline{1,n}$) и их фильтрация на основе статистических характеристик, определяемых на протяжении диагностического интервала w.

² Процедура маркирования обучающих данных описана в Приложении Б.

К наиболее распространённым характеристикам S_j , $j \subset \overline{1,m}$, также именуемым как вторичные переменные (ВП) или статистические фильтры, относятся минимальное M_{imin} и максимальное M_{imax} значение измеряемой величины M_i в пределах диагностического интервала w_k , $k \subset \overline{1,l}$, среднее значение $\overline{M_i}$, диапазон значений Δ_w M_i и вариация $\sigma^2(M_i)$ и суммарное значение $\sum_w M_i$.

Значения вторичных переменных зависят как от измеряемых величин $M_i, i \subset \overline{1,n}$, так и от размера диагностического интервала w, отражающего объём обрабатываемых диагностических данных. Например, если рассматривать спектральные характеристики напряжённости ЭМП от системы зажигания, то длительность w может варьироваться от 10 МГц до нескольких Учитывая разнообразие измеряемых величин M_i , $i \subset \overline{1,n}$, сотен МГц. переменных $S_i, j \subset \overline{1,m}$ и масштабируемость вариацию вторичных интервалов $w_k, k \subset \overline{1,l}$, количество их возможных диагностических комбинаций растёт экспоненциально с увеличением n, m и l, что делает неоходимым использование методов компьютерного интеллекта и машинного обучения для поиска наиболее репрезентативных выборок данных. Решение этой задачи возлагается на интеллектуальный интерфейс пользователя, который взаимодействует с интеллектуальными датчиками и адаптивной ИИС в составе разрабатываемого ИДК.

Интеллектуальные датчики обработки диагностических данных (уровень анализа данных концептуальной модели смотри рисунок 3.3). Осуществив выборку наиболее значимых диагностических данных, их можно подавать на вход интеллектуальных датчиков, представляющие собой, программно реализованные экспертные системы или эмпирические модели с возможностью самообучения. Для построения ИД в данной работе используются следующие алгоритмические подходы:

- обучение «с учителем»:
 - искусственные нейронные сети (ИНС);

- метод опорных векторов (МОВ);
- Байесовские сети (БС);
- обучение «без учителя»:
 - алгоритм ближайших соседей (АБС);

Принципы работы ИД на основе ИНС и МОВ были подробно описаны в разделе 1.9. Остальные алгоритмические решения можно отнести к категории вероятностных вычислений (ВВ), упомянутых в этом же разделе, которые также способны осуществлять классификацию диагностических данных. Так Байесовские сети оперируют с таблицами вероятностей измеряемых величин и вторичных переменных, на основе которых определяются вероятности того или иного результата диагностики. Алгоритм ближайших соседей (АБС) проводит процесс кластеризации диагностических данных, а именно распределение информации из базы данных по группам (кластерам) с одновременным определением этих групп. Основным преимуществом АБС является то, что для анализа данных не требуется предварительное задание кластеров, что делает возможным для этого алгоритма обучаться «без учителя» [61, 63].

Bce вышеперечисленные алгоритмы, лежащие В основе соответствующих ИД, производят интеллектуальный анализ диагностических данных, обладая при этом свойством самообучения. Указанный список алгоритмов для проведения интеллектуального анализа данных нельзя считать исчерпывающим – в него не вошли регрессионный анализ, прогнозирование временных рядов, ассоциативные подходы, деревья решений, системы, основанные на прецедентах, и логические индуктивные системы. Некоторые из методов не включены, так как не применимы для решения поставленной задачи (например, регрессионный анализ, требующий количественных оценок измеряемых величин), другие – из-за ограниченности и специфических особенностей баз данных, имеющихся в наличии (системы, основанные на прецедентах).

Тем не менее, из-за присутствия в составе ИДК нескольких ИД, использующих различные алгоритмы интеллектуального анализа данных, для обобщённого описания ИД в дальнейшем будет использован следующий формат:

Интеллектуальный датчик
$$\sim (\mathcal{L}, \overline{S}, \overline{p}),$$
 (4.1)

где \mathcal{L} - алгоритм обучения, \overline{S} - вектор вторичных переменных, \overline{p} – вектор параметров самого алгоритма (в частности, для ИНС составляющими этого вектора являются количество слоёв и нейронов в каждом слое, а также уровень допустимой ошибки на стадии обучения).

Основным критерием качества ИД является корректность классификации диагностических данных, численно выражаемой в виде матрицы неточностей, примеры которой приведены в Разделе 3.2.3, или в соотношении правильно или неправильно интерпретированных данных.

Очевидно, что качество ИД определяется не только используемым алгоритмом интеллектуального анализа данных \mathcal{L} , но и правильностью выбора вторичных переменных \overline{S} , а также алгоритмических параметров \overline{p} . Решение задачи правильности выбора этих величин возлагается на систему адаптации ИДК, описанную ниже.

Адаптация и настройка интеллектуальных датчиков (уровень интерпретации данных концептуальной модели смотри рисунок 3.3). Как видно из рисунка 4.2, ИДК оснащён возможностью адаптировать и настраивать интеллектуальные датчики для улучшения их диагностических характеристик. Для реализации этой возможности используется адаптивная ИИС в составе ИДК, которая структурирует формат ИД - $(\mathcal{L}, \overline{S}, \overline{p})$ – и оптимизирует тип и значение факторов, определяющих качество их диагностического анализа.

Работа адаптивной ИИС базируется на применении генетических алгоритмов (ГА), входящих в инструментарий машинного обучения и представляющих эффективное средство решения комбинаторных и

оптимизационных задач. Одним из ограничений универсальности ГА в задачах извлечения знаний сопряжено со сложностью оценки статистической значимости полученных решений и с трудностью построения критериев отбора удачных решений [94, 120].

Для отбора наиболее точных ИД достаточно легко предложить эффективный критерий, базирующийся на корректной интерпретации диагностических данных, а требуемый уровень статистической значимости можно достигнуть за счёт неоднократного повторения анализа данных оцениваемым ИД.

Программная реализация метода генетических алгоритмов для адаптации и настройки ИД, выполненная на языке программирования Java (SE версия 7) в интегрированной среде разработки Net beans (версия 8.0.2), приведена в Приложении В.

Разработанное программное обеспечение (ПО) является составной частью ИДК и проводимые им адаптация, и настройка ИД позволяет извлекать знания о наиболее эффективных способах анализа диагностических данных. Таким образом, данное ПО оперирует на верхнем уровне концептуальной модели проведения диагностики ЭМС (смотри рисунок 3.3), повышая тем самым степень интеллектуализации ИДК.

Помимо использования генетических алгоритмов для настройки параметров ИД, существуют специализированные программные оболочки и инструментальные средства для оценки и усовершенствования классификаторов, использующих методы машинного обучения. Их краткий обзор приведён в следующем разделе.

Инструментальные средства разработки **ИДК.** Для облегчения разработки интеллектуально-информационных систем существует набор программных средств и приложений, классифицируемых по языку и парадигме программирования, способам приобретения и представления знаний, а также по технологии разработки интеллектуальных приложений. В начале главы 3 были описаны примеры инструментальных средств (ENCOG)и

программных оболочек (WEKA), применимых для построения диагностических ИД.

Помимо указанных пакетов программ, в помощь разработчику ИИС предлагается достаточно большое количество специализированных и универсальных инструментальных средств, позволяющих проводить интеллектуальный анализ данных. Из всего их многообразия целесообразно выделить следующие два:

- **OpenML** (www.openml.org) представляет собой открытую программную оболочку для анализа данных и потоков операций. Эта включает большинство алгоритмов машинного обучения, используемых для классификации данных и поддержки принятия решений. К наиболее удобным функциональным возможностям OpenML можно отнести её способность работать с базами данных, определяемых пользователем. Эти базы данных могут быть загружены в ОрепМL программную оболочку, для их анализа может быть применён широкий спектр программных средств, интегрированных в OpenML, и результаты анализа, проведённого разными средствами, могут быть сравнены между собой с целью определения наиболее эффективного или удобного классификационного алгоритма.
- **Auto-WEKA** (www.cs.ubc.ca/labs/beta/Projects/autoweka) также является программной оболочкой, позволяющей применять, настраивать и автоматизировать процесс оптимизации алгоритмов машинного обучения. Все те алгоритмы, которые доступны в среде WEKA, могут быть автоматически настроены на наиболее эффективный режим работы, что позволяет пользователям этого пакета выявить наилучший с их точки зрения алгоритм.

Несмотря на удобство использования вышеупомянутых программных средств разработки ИИС, они реализованы либо с использованием веб технологий (OpenML), либо оперируют специальной В среде (Auto-WEKA), программирования существенно что усложняет ИХ ИДК. В непосредственную интеграцию данной работе В ЭТИ

инструментальные средства могут использоваться только для сравнения выбора алгоритмов интеллектуального анализа диагностических данных и результатов настройки этих алгоритмов в ситуациях, когда это возможно или целесообразно.

В ходе экспериментальных исследований, описанных в следующем разделе, таких ситуаций не возникало.

4.3 Экспериментальный анализ алгоритмических возможностей интеллектуального диагностического комплекса

На электромагнитную совместимость автомобильного оборудования с системой зажигания ДВС оказывает влияние большое количество факторов, основные из которых были описаны в главе 1. Для проведения экспериментального анализа возможностей ИДК были выделены следующие шесть факторов, критерием отбора которых явилось наличие диагностических данных, показывающих их воздействие на ЭМС электрооборудования [50]:

- пробег автомобиля (1000...130000 км);
- тип катушки зажигания («Север», Новосибирск, и МЗАТЭ-2, Москва);
- тип топлива (природный газ, бензин);
- обороты двигателя (800...2000 об/мин);
- угол опережения зажигания (8...30°);
- тип высоковольтных проводов (ВВП) (с активным и комплексным сопротивлением);

Для каждого из этих факторов были сняты спектральные распределения напряжённости электромагнитных помех (E, дБ (мкВ/м)), представляющие собой диагностические базы данных, подлежащие анализу с помощью интеллектуальных датчиков. Сами спектральные распределения не могут быть непосредственно проанализированы ИД — на их основе формируются вторичные переменные (ВП) (S_j , $j \subset \overline{1,m}$), производящие выборку значений напряжённости ЭМП, E, на диагдиагностических интервалах варирующейся продолжительности w_k , $k \subset \overline{1,l}$.

Задачу выбора ВП, решаемую с помощью интеллектуального интерфейса пользователя, нельзя считать тривиальной по следующим причинам:

- единственным доступным источником диагностических данных являются спектральные распределения ЭМП, полученные только для определённых значений вышеперечисленных факторов, влияющих на уровень помех прямое измерение (и изменение) количественных факторов (таких как пробег, УОЗ, обороты двигателя) не представляется возможным;
- сами спектральные распределения ЭМП не дают однозначного ответа на вопрос об ЭМС автомобильной системы зажигания, что зачастую субъективирует процесс интерпретации диагностических данных, особенно на этапе построения обучающих пар для ИД.
- даже при успешном проведении субъективной интерпретации диагностических данных для промежуточных значений количественных факторов, влияющих на уровень ЭМП, данные, принадлежащие разным классам, могут смешиваться, как видно из рисунка 4.3. Это осложняет работу классификационных алгоритмов и делает необходимым увеличение числа вторичных переменных, анализируемых ИД.

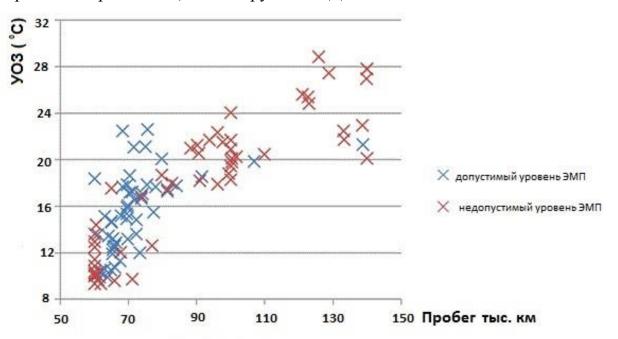


Рисунок 4.3 - Неоднозначность кластеризации при недостаточном наборе вторичных переменных

На рисунке 4.3 представлены диагностические данные, соответствующие допустимому и недопустимому уровню помех при 139

рассмотрении спектральных распределений ЭМП, характеризующих максимальное значение напряжённости E_{max} на диагностическом интервале $w=100~\mathrm{M}\Gamma$ ц в зависимости от пробега и величины опережения угла зажигания. Как следует из этой иллюстрации, рассмотрение только максимальных значений напряжённости не позволяет с достаточной уверенностью классифицировать результаты диагностики.

Поэтому правильный выбор числа и типа как измеряемых величин, так и вторичных переменных предельно важен для создания информативных баз данных, особенно для случаев, когда объём и разнообразие данных сильно лимитировано. Далее будут рассмотрены подходы к систематизации этого выбора.

Выбор измеряемых величин. В начале текущей главы был указан список шести факторов, влияние которых на уровень ЭМП было исследовано в [50]. В то же время можно предположить, что значимость диагностических данных для применяемых интеллектуальных датчиков, полученных в результате изменения каждого из факторов, будет различной. Для подтверждения этой гипотезы был проведён дробный факторный эксперимент с использованием статистического пакета MINITAB, целью которого было выявление наиболее значимых факторов, с одной стороны влияющих на уровень ЭМП, а с другой — на эффективность ИД в интерпретации диагностических данных.

Дизайн и результаты этого эксперимента сведены в Таблицу 4.1, которая демонстрирует усреднённые значения правильно идентифицированных данных по диагностике уровня ЭМП для четырёх видов вторичных переменных (E_{max} , \overline{E} , ΔE , $\sigma^2(E)$), поступающих на входы ИД, которые алгоритмически реализуют ИНС, МОВ, БС и АБС.

Таблица 4.1 - Дизайн и результаты дробного факторного эксперимента

| Экс. | Пробег, | Тип | Тип | Обороты | уоз | Тип | ИНС | MOB | БС | АБС |
|----------|---------|-----------------------------|--------|-----------------------|-----|----------|-------|-------|-------|-------|
| No No | КМ | катушки топлива об/мин-1 0С | | ВВП Достоверность (%) | | | | | | |
| 1 | 1000 | «Север» | газ | 850 | 8 | активное | 92.59 | 83.33 | 79.63 | 59.26 |
| 2 | 1000 | «Север» | газ | 2000 | 8 | компл. | 83.87 | 80.65 | 80.65 | 69.35 |
| 3 | 130000 | «Север» | газ | 850 | 30 | активное | 92.59 | 88.89 | 79.63 | 70.37 |
| 4 | 130000 | «Север» | газ | 2000 | 30 | компл. | 98.61 | 97.22 | 93.06 | 81.94 |
| 5 | 1000 | МЗАТЭ-2 | газ | 2000 | 30 | активное | 63.24 | 61.76 | 57.35 | 52.94 |
| 6 | 1000 | МЗАТЭ-2 | газ | 850 | 30 | компл. | 63.24 | 57.35 | 63.24 | 60.29 |
| 7 | 130000 | МЗАТЭ-2 | газ | 2000 | 8 | активное | 92.39 | 94.57 | 94.57 | 91.30 |
| 8 | 130000 | МЗАТЭ-2 | газ | 850 | 8 | компл. | 96.30 | 90.74 | 94.44 | 81.48 |
| 9 | 1000 | «Север» | бензин | 2000 | 30 | активное | 85.16 | 87.5 | 85.94 | 80.47 |
| 10 | 1000 | «Север» | бензин | 850 | 30 | компл. | 78.57 | 70.63 | 70.63 | 65.87 |
| 11 | 130000 | «Север» | бензин | 2000 | 8 | активное | 95.14 | 94.44 | 93.75 | 88.89 |
| 12 | 130000 | «Север» | бензин | 850 | 8 | компл. | 82.80 | 70.97 | 72.43 | 68.28 |
| 13 | 1000 | МЗАТЭ-2 | бензин | 850 | 8 | активное | 90.36 | 79.52 | 78.31 | 70.48 |
| 14 | 1000 | МЗАТЭ-2 | бензин | 2000 | 8 | компл. | 88.78 | 86.73 | 78.57 | 53.06 |
| 15 | 130000 | МЗАТЭ-2 | бензин | 850 | 30 | активное | 80.77 | 80.29 | 76.44 | 67.79 |
| 16 | 130000 | МЗАТЭ-2 | бензин | 2000 | 30 | компл. | 93.90 | 94.51 | 91.46 | 69.51 |

Для дробного факторного эксперимента используются только пороговые значения влияющих на ЭМП факторов (минимальное и максимальное значения для количественных факторов и типовые значения для качественных).

На основе полученных результатов, пакет MINITAB определяет значения t- и F-статистик, используемых для вычисления p-параметра, малые (≤ 0.05) значения которого показывают, что вариации в показателях точности используемых ИД не могут быть объяснены только случайной составляющей процесса обучения ИД. Такие значения параметра p говорят о существенном влиянии выбранных факторов на диагностические возможности интеллектуальных датчиков [1, 89, 94, 105].

В Таблице 4.2 приведены все значения р - параметра, полученные в результате проведения дробного факторного эксперимента.

ТАБЛИЦА 4.2. Уровень значимости выбранных факторов на эффективность ИД

| Измардами за радиници | Значения р-параметра | | | | | | |
|------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|--|--|--|
| Измеряемые величины | ИНС | MOB | БС | АБС | | | |
| пробег | 0.012 | 0.006 | 0.001 | 0.036 | | | |
| тип катушки зажигания | 0.053 | 0.076 | 0.013 | 0.214 | | | |
| тип топлива | 0.321 | 0.346 | 0.194 | 0.912 | | | |
| обороты ДВС | 0.132 | 0.012 | 0.002 | 0.172 | | | |
| угол опережения зажигания | 0.021 | 0.035 | 0.002 | 0.256 | | | |
| тип высоковольтных проводов | 0.588 | 0.121 | 0.588 | 0.269 | | | |
| пробег* тип КЗ | 0.097 | 0.032 | 0.002 | 0.205 | | | |
| пробег*тип топлива | 0.020 | 0.013 | 0.002 | 0.107 | | | |
| пробег*обороты | 0.083 | 0.100 | 0.004 | 0.171 | | | |
| пробег*УОЗ | 0.022 | 0.017 | 0.008 | 0.150 | | | |
| пробег*тип ВВП | 0.104 | 0.283 | 0.025 | 0.913 | | | |
| тип КЗ*обороты | 0.468 | 0.186 | 0.003 | 0.079 | | | |
| тип КЗ *тип ВВП | 0.062 | 0.028 | 0.003 | 0.845 | | | |

Как видно из таблицы, значимыми факторами (выделенными жёлтым цветом) по крайней мере, для трёх из четырёх используемых ИД (соответствующие малые значения р-параметра выделены красным цветом), являются:

- пробег автомобиля;
- угол опережения зажигания.

Помимо этого, существенное влияние на способность ИД правильно интерпретировать диагностические данные оказывают характеристики пробега автомобиля в функции УОЗ, а также пробега в функции типа топлива. Поэтому в дальнейших экспериментах и работе ИДК будут рассматриваться только эти три (пробег, УОЗ, тип топлива) измеряемые величины. При этом следует оговориться, что здесь ни в коем случае не отвергается влияние остальных факторов на уровень ЭМП – все, что утверждается на основании факторного эксперимента, так это значимость влияния выявленных факторов на диагностические возможности используемых ИД, определяющих их применимость в составе ИДК.

Определение вторичных переменных для диагностики ЭМП. Математически вторичные переменные (ВП) $(S_j, j \subset \overline{1, m})$ в рамках данной

работы вычисляются как статистические показатели (фильтры) f^j на определённом диагностическом диапазоне w_k , $k \subset \overline{1,l}$ измеряемой величины M_i , $i \subset \overline{1,n}$:

$$S_j = f_{w_k}^j(M_i) \tag{4.2}$$

В нашем случае в качестве M_i выступают последовательности значений спектрального распределения напряжённости ЭМП, $E(M_i)$, снятые при проведении исследования влияния на уровень ЭМП различных факторов. В предыдущем разделе мы сузили набор интересующих нас факторов до трёх – пробег автомобиля, тип используемого топлива и УОЗ. Задачей данного раздела является выяснение зависимости правильности интерпретации интеллектуальными датчиками анализируемых данных от величины диагностического интервала w_k , а также от вида и числа статистических показателей f^j . [1, 89, 105]

Для этого сначала целесообразно провести эксперимент, исследующий характер зависимости точности ИД от величины диагностического интервала или от объёма выборки данных, необходимых для диагностического анализа. Семь различных значений диагностического интервала были определены в соответствии с диапазоном частотных значений (30...1000 МГц) имеющихся в наличии спектральных распределений напряжённости ЭМП – 10, 20, 50, 100, 200, 300, 600 МГц. Затем был проведён эксперимент с тем же набором интеллектуальных датчиков (ИНС, МОВ, БС, АБС), что и в процессе выбора измеряемых величин, и с теми же вторичными переменными $(E_{max}, \overline{E}, \Delta E,$ $\sigma^2(E)$). При составлении обычающих пар для ИД с использованием «учителя» множество было сбалансировано, TO есть пар количество пар, соответствующих приемлемому и недопустимому уровню ЭМП, было одинаковым.

Для подтверждения значимости результатов экспериментов была проведена десятикратная перекрёстная проверка, процедура которой заключается в делении множества диагностических данных на десять частей, в использовании девяти частей для обучения ИД, а последней части для тестирования, после чего процесс повторяется десять раз, но с другими разбиениями диагностических данных.

Результаты экспериментов с величиной диагностического диапазона *w* приведены на рисунке 4.4:

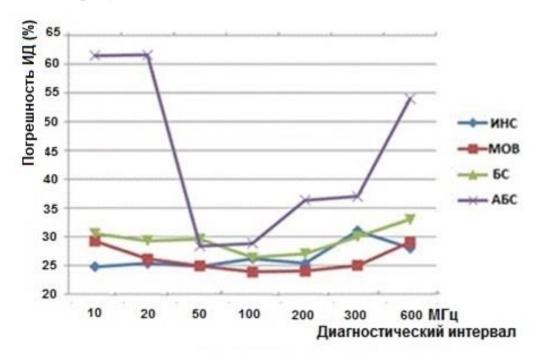


Рисунок 4.4 - Зависимость погрешности ИД от величины диагностического интервала

Как видно из приведённых результатов, ИД «с учителем» (т.е. ИНС, МОВ и БС) демонстрируют более высокую точность, причём слабо зависящую от диагностического интервала. Тем не менее, наименьшая погрешность достигается датчиком на основе МОВ (23%) при величине диагностического интервала в 100 МГц. Это значение интервала и будет использоваться в дальнейшем для проведения экспериментальных исследований.

Следующим этапом определения вторичных переменных для диагностики допустимости уровня ЭМП является поиск оптимального набора ВП, обеспечивающего наибольшую эффективность рассматриваемых ИД с точки зрения точности идентификации диагностических данных. В дополнение к вторичным переменным, использованным в предыдущих

экспериментах (E_{max} , \overline{E} , ΔE , $\sigma^2(E)$), два других статистических показателя были введены в рассмотрение — минимальное значение напряжённости ЭМП на диагностическом интервале (E_{min}) и суммарное значение всех диагностических данных на интервале (ΣE), которое характеризует мощность помехи в заданном частотном диапазоне.

Для нахождения наиболее результативных ВП с точки зрения выявления информационного контента из диагностических данных были задействованы адаптивные свойства ИДК посредством реализации генетических алгоритмов (ГА) как метода машинного обучения. Число и вид вторичных переменных были закодированы в виде специальных структур данных (хромосом), используемых ГА для эволюционного поиска их оптимальных значений – код программы генетических алгоритмов приведён в Приложении В. [1, 89, 94]

Данные, полученные в ходе эксперимента, и конечные результаты показаны на рисунке 4.5 и в таблице 4.3.



Рисунок 4.5 - Зависимость погрешности интеллектуальных датчиков от числа ВП

Экспериментальные данные указывают на то, что наилучшая точность интерпретации достигается выбранным для этого анализа ИД на базе МОВ при использовании четырёх вторичных переменных (ВП). Виды найденных ВП

для каждого сценария проведения эксперимента идентифицированы в Таблице 4.3.

ТАБЛИЦА 4.3 - Оптимальные наборы ВП в зависимости от их числа

| Тип ВП | Число ВП | | |
|----------------|----------|---|---|
| | 2 | 4 | 6 |
| E_{max} | V | | |
| E_{min} | | | |
| \overline{E} | | | |
| ΔE | | | |
| $\sigma^2(E)$ | V | V | |
| $\sum E$ | | | √ |

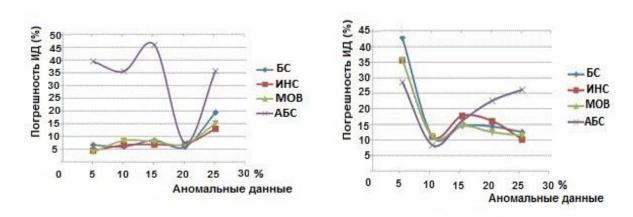
Сравнительный анализ результативности ИД. Определив значимые измеряемые величины M_i , $i \subset \overline{1,3}$, а также оптимальное число (m=4) и вид вторичных переменных для исходных диагностических данных, последнее экспериментальное исследование в рамках анализа алгоритмических возможностей, предлагаемого к рассмотрению ИДК, было связано с изучением интеллектуальных свойств датчиков, входящих в его состав. Это изучение проводится посредством изменения степени сложности поставленной задачи диагностики и количества информации, доступной интеллектуальным датчикам для обучения.

Степень сложности диагностической задачи меняется соотношением объёма аномальных данных, то есть соответствующих недопустимому уровню ЭМП, ко всем данным, находящимся в распоряжении исследователя. В проводимых экспериментах это соотношение меняется в пределах от 5% до 25% - при малом количестве аномальных данных интеллектуальные датчики должны достаточно легко их выделять за счёт проводимого процесса обучения и за счёт противопоставления аномальным данным большого количества «нормальных» данных, соответствующих допустимому уровню помех. Когда же процент аномальных данных увеличивается, начинает происходить смешение двух типов данных (смотри рисунок 4.3), что неизбежно усложняет задачу диагностики «аномалий».

Эта задача может усложняться и когда количество обучающей информации, необходимой ИД для проведения интеллектуального анализа данных, уменьшается. Такая ситуация моделируется при использовании сбалансированных обучающих данных, то есть таких выборок обучающих пар, в которых присутствует равное количество диагностических данных, соответствующих приемлемому и недопустимому уровню ЭМП. При этом, когда соотношение аномальных данных к общему объёму низко, требование сбалансированности обучающих данных влечёт за собой уменьшение количества информации доступной для обучения ИД.

Поставив перед исследуемыми ИД диагностические задачи одинаковой сложности, затем снабдив их тем же количеством информации, была проведена серия экспериментов по сравнению возможностей интеллектуального анализа данных, проводимым каждым из датчиков.

Результаты экспериментов обобщены на рисунках 4.6 (a) и (б), соответствующих двум сценариям эксперимента – с несбалансированными и со сбалансированными обучающими данными.



а. Несбалансированные обучающие данные b. Сбалансированные обучающие данные

Рисунок 4.6 -Диаграммы зависимостей погрешностей интеллектуальных датчиков от объема обучающих данных

Сравнительный анализ экспериментальных данных показывает, что все ИД, проходящие обучение «с учителем», демонстрируют приблизительно одинаковую результативность в решении задач диагностики с изменяющейся

степенью сложности — небольшую преференцию можно отдать ИД на базе ИНС, но в целом датчики этого типа взаимозаменяемы. В отношении ИД, реализующего АБС, следует сказать, что качество его работы значительно ниже при первом сценарии проведения эксперимента. Это можно объяснить тем фактом, что АБС не использует стратегию обучения «с учителем», в силу чего состав и объём обучающей информации не оказывает не него влияния, так как она просто игнорируется, что в свою очередь ухудшает результативность.

Тем не менее, для второго экспериментального сценария, когда количество обучающей информации недостаточно для ИНС, МОВ и БС, интеллектуальные датчик на основе АБС достигает высоких показателей точности, что делает его включение в состав ИДК целесообразным.

Данные эксперименты показывают, что указанные ИД, входящие в состав ИДК, с высокой степенью точности диагностируют превышение уровня ЭМП. Этот факт дает нам возможность использовать ИДК для разработки программного кода электронного блока управления двигателем внутреннего сгорания и оптимизации процесса его настройки, что позволяет выводить диагностические коды ошибок, указывающих на превышение уровня ЭМП через монитор маршрутного компьютера. Водителю АТС, когда он увидит код ошибки, обозначающий превышение уровня ЭМП, необходимо будет ехать в специализированный сервисный центр.

4.4 Выводы по главе

- 1. Апробирован созданный на базе ИИС диагностический комплекс, который осуществляет интеллектуальный анализ данных, характеризующий уровень ЭМП, влияющий на ЭМС электрооборудования автомобиля, который имеет погрешность 5-10%.
- 2. На основании имеющихся диагностических данных, были выделены факторы, которые с точки зрения точности интерпретации диагностических данных интеллектуальными датчиками являются наиболее значимыми. К ним относятся величина пробега автомобиля, отражающая степень износа его систем и механизмов, тип используемого топлива, влияющего на работу системы зажигания, и угол опережения зажигания, проявляющийся в уровне помех, генерируемых системой зажигания.
- 3. Реализованные В составе диагностического комплекса обрабатывают интеллектуальные датчики вторичные переменные, предназначенные для выявления информативного контента, содержащегося в В ходе проведённых диагностических данных. экспериментальных исследований были определены вторичные переменные, обеспечивающие наиболее эффективную работу интеллектуальных датчиков в интерпретации диагностических данных. Таким вторичными переменными напряжённости ЭМП, усреднённое максимальное значение значение, диапазон изменения и дисперсия напряжённости на диагностическом интервале.
- 4. Преимуществом интеллектуального диагностического комплекса от существующих средств обработки диагностических данных является его способность к адаптации и настройке внутренних параметров. Данное преимущество продемонстрировано при использовании алгоритмов машинного обучения (генетических алгоритмов), осуществивших выбор вышеуказанных вторичных переменных для обработки интеллектуальными датчиками с погрешностью 5-10%.

5. Сравнительный анализ результативности и интеллектуальных возможностей, входящих в состав ИДК датчиков показал предпочтительность алгоритмов обучения «c учителем» использования В частности, интеллектуального датчика на базе искусственных нейронных сетей. В то же время, уровень погрешности в интерпретации диагностических данных на уровне 10-15%, что говорит об отсутствии необходимости снабжения ИДК большим количеством компонентов, использующие одинаковые методики обучения. При этом целесообразно иметь в наличии интеллектуальные датчики, не требующие более 10% от общего объёма обучающих данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования сводятся к следующему:

- 1 Адаптированная модель Майра применена для анализа дуговых процессов в системах зажигания автомобиля при этом экспериментальные исследования показали ее соответствие эмпирическим данным с погрешностью в 5%;
- 2 Разработана математическая модель источника электромагнитных помех, связывающая характеристики разрядных процессов в свече зажигания и параметры электромагнитной совместимости системы зажигания с другим электрооборудованием автомобиля и внешними устройствами в частотном диапазоне от 0,1 МГц до 100 МГц, имеющая погрешность 7%;
- 3 Разработана методика анализа уровня помех с использованием алгоритмических датчиков, позволяющая выявлять проблемы ЭМС на основании интеллектуальной обработки измерительных данных и комплексно обеспечивать уменьшение уровня ЭМП до 30%;
- 4 Разработана концепция универсального диагностического комплекса способного классифицировать причины повышенного уровня помех, через использование интеллектуальных датчиков, объединенных в ИДК, обеспечивающий формирование баз диагностических данных, с целью адаптации и обучения;
- 5 Разработана методика настройки интеллектуального диагностического комплекса на обработку спектральных распределений напряжённости ЭМП, полученных при различных режимах работы ДВС, с погрешностью в 5%.
- 6 Разработаны интеллектуальные датчики в составе ИДК ЭМС электрооборудования автомобиля, что позволило расширить номенклатуру решаемых диагностических задач от мониторинга предельно допустимого

уровня разрядных помех в автомобиле до диагностики систем помехоподавления, идентифицирующей причину повышенного уровня ЭМП и сообщающего об этом водителю автомобиля.

Указанные результаты научных исследований имеют внедрение в работе ОАО «АВТОВАЗ» для разработки программного кода электронного блока управления двигателем внутреннего сгорания и оптимизации процесса его настройки с целью предупреждения водителя о превышении уровня ЭМП. В научно-исследовательском центре «IDEAS» университета Роберта Гордона (Великобритания) получено практическое применение разработанных интеллектуально-информационных инструментов диагностики ДЛЯ неисправностей связанных с ЭМС СЗ электрооборудования автомобилей. Также результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Электромеханика И автомобильное электрооборудование» электротехнического факультета ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в ходе курсового и дипломного проектирования.

Библиографический список

- 1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. М.: Наука, 1976. –277с.
- 2. Андрейчиков А.В., Андрейчиков О. Н. Интеллектуальные информационные системы. [Текст] М.: «Финансы и Статистика», 2004.
- 3. Бадамлов А.Л. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник. [Текст] / А.Л. Бадамлов, А.С. Михайлов. –М.: Радио и связь, 1990. 356 с.
- 4. Базенков Н.И. Нелинейные эффекты и электромагнитная совместимость: учебное пособие. [Текст] / Н.И. Базенков. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 1997. 263 с.
- 5. Базуткин В.В., Дмоховская Л.Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. [Текст] /В.В. Базуткин, Л.Ф. Дмоховская. М.: Энергоатомиздат, 1983. 328 с.
- 6. Балагуров В.А. Аппараты зажигания. [Текст] /В.А.Балагуров. М.: Машиностроение, 1968. 351 с.
- 7. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. [Текст] / Дж. Барнс. - М.: Мир, 1990. – 238 с.
- 8. Башмаков В.В. Расчет и конструирование электромагнитных экранов радиоэлектронной аппаратуры. [Текст] /В.В. Башмаков, Е.М. Лазарев, А.П.Левин. М.: Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, 1988. 78 с.
- 9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники [Текст] /Т 1,2,3. М.: 1996.
- Бобров В.И. Надежность технических систем [Текст]. Учебное пособие М.: МГУП, 2004
- 11. Буров К. Обнаружение знаний в хранилищах данных. // Открытые

- системы, 1999, № 5-6.
- 12. Виноградов Е.М. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. [Текст] /E.М. Виноградов– Л.: Судостроение, 1986. 264 с.
- 13. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. [Текст] /М.Л. Волин. –М.: Радио и связь, 1981 – 263 с.
- 14. Володина Н.А. Проблемы электромагнитной совместимости электронной аппаратуры и электрооборудования автотранспортных средств. [Текст] /H.A. Володина, А.К. Старостин. –М.: НИИАЭ, 1996. 260 с.
- 15. Володина Н. А. Устройство для измерения напряжения помех. [Текст] /Патент на изобретение № 2168183 Российская федерация. Заявитель и патентообладатель Володина Н. А. Опубл. 2001.
- 16. Глезер Г.Н. Автомобильные системы зажигания. [Текст] /Г.Н.Глезер, И.М.Опарин. М.: Машиностроение, 1977. 144 с.
- 17. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. [Текст] / И.С. Гоноровский. М.: Советское радио, 1971 г. 672 с.
- Графкина М. В., Борисова Н. С. Результаты Исследования Электромагнитных Помех Транспортного Потока. [Текст] // Новое слово в науке и технике: гипотезы и апробации результатов исследований, 2014. №11. С. 33-36.
- 19. ГОСТ 50397-92. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Термины и определения. [Текст] // М.: Издательство стандартов, 1993. 15 с.
- 20. ГОСТ 28279-89. Совместимость электромагнитная электрооборудования автомобиля и автомобильной бытовой радиоэлектронной аппаратуры. Нормы и методы измерений. [Текст] /Введ. 01.01.1991 М.: Изд-во стандартов, 1991. 15 с.
- 21. ГОСТ 28751-90. Электрооборудование автомобилей. Электромагнитная совместимость. Кондуктивные помехи по цепям питания. Требования и методы испытаний. [Текст] /Введ. 01.01.1992 М.: Изд-во стандартов, 1992. 20 с.

- 22. Грановский И.Л. Динамические измерения. Основы метрологического обеспечения. [Текст] / И.Л. Грановский. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 411 с.
- 23. Гурский А.Д. Вычисления в MathCAD. [Текст] / А.Д. Гурский. Минск: Новое знание, 2003. – 814 с.
- 24. Дьяченко, Д. Е. Интеллектуализация экспертно-диагностического процесса на основе нейросетевого моделирования и нечеткой логики [Текст]: дисс. канд. тех. наук. / Д. Е. Дьяченко. Воронеж: ВГТУ, 2004. 150 с.
- 25. Заде J. L Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. [Текст] М.: Мир, 1976. 167с.
- 26. Залманзон Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара. [Текст] /Л.А. Залманзон. М.: Наука,1989. 496 с.
- 27. Захаров Е.В. Численный анализ дифракции радиоволн. [Текст] /E.В. Захаров, Ю.В. Пименов [Текст]. М.: Радио и связь, 1982. 347 с.
- 28. Зельман М.А. Метрологические основы технических измерений. [Текст] / М.А. Зельман. М.: Изд-во стандартов, 1991. 121 с.
- 29. Ивахненко И. Г., Юрачковский Ю. П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. [Текст] М.: «Радио и Связь», 1987.
- 30. Иоссель Ю.Я. Расчет электрической емкости. [Текст] / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. Л.: Энергоиздат, 1981. 288 с.
- 31. Кириченко В.И. Результаты исследования радиопомех, создаваемых автотранспортом. [Текст] /В.И. Кириченко // Проблемы ЭМС РЭС различного назначения: 2-е Всесоюз. науч.-техн. совещание. НТОРЭС им. А.С. Попова, 1978. С. 61.
- 32. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей. [Текст] / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. Л.: Энергия, 1970. 416 с.
- 33. Кечиев Л.Н. ЭМС: стандартизация и функциональная безопасность. [Текст] /Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. – М.: МИЭМ, 2001 – 82 с.
- 34. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной

- совместимости радиоэлектронных средств. [Текст] / А.Д. Князев— М.: Радио и связь, 1984. 336 с.
- 35. Конторович М.И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях. [Текст] / М.И. Конторович М.: Советское радио, 1975. 320 с.
- 36. Конюхов Н.Е. Качественные показатели ДВС при управлении по каналу разрядного тока [Текст] / Н.Е. Конюхов, П.А. Николаев, Р.Р. Соешев // Вестник СГАУ. 2010. №1. С. 216-220.
- 37. Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю. Системы управления с нечеткой логикой. [Текст] СПб. 1999.
- 38. Коровкин Н.В. Моделирование волновых процессов в распределенных электромагнитных системах. [Текст] /Н.В. Коровкин, Е.Е. Селина. СПб.: СПбГТУ, 1992. 264 с.
- 39. Кругов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания. [Текст] / В.И. Кругов. М.: Машиностроение, 1998.
- 40. Крутов В.И. Электронные системы регулирования и управления двигателями внутреннего сгорания. [Текст] /В.И. Крутов. М.: МГТУ, 1991. Кубанов В.П. Основы электромагнитной экологии. /В.П. Кубанов, Ю.М. Сподобаев. М.: Радио и связь, 2000. 240 с.
- 41. Кулебякин В.С. Электрические системы зажигания, обогрева и освещения самолетов. [Текст] /В.С. Кулебякин, И.М. Синдеев, П.Д. Давидов, Б.Ф. Федоров. М.: ОБОРОНГИЗ, 1960
- 42. Ларичев О. И. Системы, основанные на экспертных знаниях: история, современное состояние и некоторые перспективы. Сб. научных трудов Седьмой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием. [Текст] М.: Издательство физикоматематической литературы, 2000.
- 43. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. [Текст] СПб.: БВХ-Петербург, 2005
- 44. Максимов М.В. Защита от радиопомех. [Текст] /М.В. Максимов. М.:

- Советское радио, 1976. 496 с.
- 45. Маркин Н.С. Метрология. Введение в специальность. [Текст] /Н.С. Маркин, В.С. Ершов. М.: Изд-во стандартов, 1991. 208 с.
- 46. Марсов В.И. Математическая модель разрядных помех при работе двигателя внутреннего сгорания на различных режимах. [Текст] / В.И. Марсов, В.Е. Ютт, П.А. Николаев // Электроника и электрооборудование транспорта. 2009. №2-3. С.52 54.
- 47. Набоких В.А. Испытания электрооборудования автомобилей. [Текст] / В.А. Набоких. М.: Академия, 2003. 256 с.
- 48. Никифоров В. О., Ушаков А. В. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность. [Текст] СПб. 2003.
- 49. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. [Текст] / В.В. Никольский. М.: Наука, 1978. 544 с.
- 50. Николаев П.А. Электромагнитная совместимость современных автомобильных систем зажигания: монография [Текст] / П.А. Николаев. Тольятти. ПВГУС, 2011. 224 с.
- 51. Новиков О.Я.: Устойчивость электрической дуги. [Текст] Л.: Энергия, 1978.— 160 с.
- 52. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. [Текст] / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. М.: Энергоатомиздат, 1985. 276 с.
- 53. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. [Текст] / Г. Отт; перевод с английского Б.Н. Бронина. М.: Мир, 1979. 317 с.
- 54. Палагута К. А., Чиркин С. Ю., Кузнецов А. В. Синтез системы управления двигателем внутреннего сгорания с использованием гибридных и нейронных сетей [Текст] // Машиностроение и инженерное образование. 2009. №4. С. 45-54.
- 55. Певницкий В.П. Аналитическая модель суммарного распределения процесса индустриальных радиопомех. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств связи. [Текст] /В.П.

- Певницкий, Ю.В. Полозок; сборник статей. М.: Радио и связь, 1980. С. 14-21.
- 56.Петровский С.В. Математическое моделирование процессов дугообразования в системе зажигания автомобиля. [Текст] // Вестник СамГТУ Серия «Технические науки» №2 (24) Самара. СамГТУ 2009.С. 199-204.
- 57. Петровский С.В. Исследование качества заземления автомобильной антенны на уровень наведенных помех [Текст] // Вестник СамГТУ Серия «Технические науки» №4 (36) Самара. СамГТУ 2012.С. 182-188.
- 58. Петровский С.В., Николаев П.А. Электромагнитная совместимость автомобильного генератора напряжения [Текст] // Известия Высших учебных заведений. Электромеханика. №5 Новочеркасск. ЮРГПУ 2014. С. 32-34.
- 59. Петровский С.В. Интеллектуально-измерительная система для идентификации и классификации радиопомех от системы зажигания автомобиля [Текст] // Сборник трудов пятой международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире 2015». Санкт-Петербург. СПГПУ, 2015. с 89-99
- 60. Панский Ф. И., Давтян Р. И., Черняк Б. Я. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания [Текст]: Учебное пособие. М.: Легион-Автодата, 2004. 136 с.
- 61. Пупков К. А., Коньков В. Г. Интеллектуальные системы: исследование и создание [Текст]. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003.
- 62. Рудаков М.Л. Зарубежные гигиенические стандарты на параметры электромагнитных воздействий в диапазоне радиочастот. / М.Л. Рудаков. [Текст] // Зарубежная радиоэлектроника. 1998. №2. С. 68—75.
- 63. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст]: Пер. с польского И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия Телеком, 2004. 452с.
- 64. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03. Гигиенические требования к размещению и

- эксплуатации передающих радиотехнических объектов. [Текст]/ Введ. 18.06.2003 M.: Минюст РФ, -2003.
- 65. Савчук В. П. Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория. 41[Текст]: Учебное пособие для вузов. Одесса: ОНПУ, 2002. 54 с.
- 66. Самарский А. А. Введение в численные методы [Текст]. М.: Лань, 2005. 288c.
- 67. Сахаров А.Д. Воспоминания [Текст] / А.Д. Сахаров. // Знамя. 1990. №12. С. 33-96.
- 68. Семенов А.А. Теория электромагнитных волн [Текст]. /А.А. Семенов. М.: МГУ, 1986. 318 с.
- 69. Сергеев А.Г. Метрологическое обеспечение автомобильного транспорта [Текст]. / А.Г. Сергеев. М.: Транспорт, 1988. 369 с.
- 70. Солодовников В. В., Матвеев П. С. Расчет оптимальных систем автоматического управления при наличии помех [Текст]. М.: Машиностроение, 1973.
- 71. Сычев Е.И. Проблемы технических измерений [Текст]. / Е.И. Сычев // Измерительная техника. 1995. № 4. С.15-17.
- 72. Тельнов Ю. Ф. Интеллектуальные информационные системы в экономике [Текст]: Учебное пособие. М.: СИНТЕТ, 1998.
- 73. Тимофеев Ю.Л: Электрооборудование автомобилей [Текст]. М.: Транспорт, 1994. 255 с.
- 74. Уайт Д. Измерение электромагнитных помех и измерительная аппаратура [Текст]. /Д. Уайт; пер. с англ. под редакцией А.Д. Князева. М.: Советское радио, 1976. 464 с.
- 75. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции [Текст]./ Т. Ульямс; пер. с англ. М.: Издательский дом «Технологии», 2004. 540 с.
- 76. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость [Текст] /Э. Хабигер. Л.: Энергоатомиздат, 1995. 384 с.
- 77. Ховах М.С., Маслов Г.С. Автомобильные двигатели [Текст]. /М.С. Ховах, Г.С. Маслов. М.: Машиностроение,1971. 456 с.

- 78. Чижиков Ю.П. Электрооборудование автомобилей [Текст]. /Ю.П. Чижиков. М.: Машиностроение, 2003. 320 с.
- 79. Чураков Е. П. Оптимальные и адаптивные системы [Текст]: Учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 256 с: ил.
- 80. Шапиро Д.Н. Основы электромагнитного экранирования [Текст]. /Д.Н. Шапиро. Л.: Энергия, 1975. 112 с.
- 81. Шеннон Р., Имитационное моделирование систем искусство и наука. М.: Мир, 1978, 302 с, ил.
- 82. Щипачев В.С. Высшая математика [Текст]. /В.С. Щипачев. М.: «Высшая школа». 2000. –479 с.
- 83. Шульце К. П., Ребер К. Ю. Инженерный анализ адаптивных систем [Текст]. / Пер. с нем. М.: Мир, 1992. 280 с, ил.
 - 84.Ютт В.Е.: Электрооборудование автомобилей [Текст]. М.: Транспорт, 2006. —439 с.
- 85. Яцкевич В.А., Викулов Ю.Н. Экраны для защиты от электромагнитных волн СВЧ–диапазона [Текст]. / В.А. Яцкевич, Ю.Н. Викулов // IV Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: сборник научных докладов. СПб.: ЛЭТИ, 2001 г. С. 451-454.
- 86. Материалы компании «УРАЛРАДИО». Снижение шумовых помех [Текст]. //URL: http://Ural-radio.ru/iblioteka/snizhenie_shumovyh_pomeh/ Екатеринбург. 2016. (последнее посещение от 12.04.2016)
- 87. Automotive electromagnetic emissions measurements [Текст]. / Automotive Engineering. 2000. №7. С. 119-122.
- 88. Baker G. Potential for a Unified Topological Approach to Electromagnetic Effects Protection [Teκcτ]. / G. Baker, J.P. Castillo. // IEEE Trans. On EMC. 1992. V.34. №3. P. 267 274.
- 89. Bhuyan, M. Intelligent Instrumentation: Principles and Applications [Текст]. CRC Press: Taylor and Francis Group, 2011. ISBN: 978-1-4200-8953-0.
- 90. Cenelec. European Prestandard: ENV 50166-2. Human Exposure to

- Electromagnetic Fields. High Frequency (100 KGz 300 GHz) [Текст]. / January. 1995.
- 91. CISPR 12. Vehicles, boats and internal combustion engines Radio disturbance characteristics Limits and methods of measurement for the protection of off-board receivers [Τεκcτ]. / 2007.
- 92. CISPR 25. International electro technical commission. Limites et methods de mesure des caracterlstigues des perturbations radioelectrigues pour la protection des recepteursutllises a bord des vehicules [Tekct]. / 2002.
- 93. Dai W.M. Special Issue on Simulation, modeling and electrical design of high-speed and high-density interconnects [Teκcτ]. / W.M. Dai // IEEE Trans. Circuits Syst.-I. Vol. 39. Nov. 1992.
- 94. Dhar V., Stein R. Intelligent Decision Support Methods [Текст]: The Science of Knowledge Work. Prentice Hall, 1997.
- 95. E DIN VDE 0848. Sicherheit in elektromagnetischen Fildern. [Текст] / 1995.
- 96. EMC development. / Automotive testing. 2005. September. C. 98-99.
- 97. Electromagnetic interference causing a buzz in the interiors. / AUTO Interiors. 2002. September. C. 26-29.
- 98. Faraji-Dana R. The current distribution and AC resistance of a micro strip structure [Текст]. / R. Faraji-Dana, Y.L. Chow // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. MTT-38. Sept. 1990. P. 450–457.
- 99. Gu Q. and Kong J.A. Transient analysis of single and coupled lines with capacitively-loaded junctions [Текст]. / Q. Gu, J.A. Kong // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Sept. 1986. Vol.34. P.952–964.
- 100. Heaton J. Programming Neural Networks with Encog 3 in Java [Текст]. Heaton Research, Incorporated, 2011.
- 101.ISO 13766. Earth-moving machinery Electromagnetic compatibility [Текст]. / 15.05.2006.
- 102.John W. EMC of Printed Circuit Boards and Microelectronic Engineering Techniques [Текст]. / W. John // Proc. of the 13-th Int. Wroclaw Symp. on EMC. June 25–28. 1996. P. 14–52.

- 103.Langley, P., Simon, H., 1995. Application of machine learning and rule induction [Tekct]. Communications of ACM, 38(11), pp. 54-69. DOI: 10.1145/219717.219768.
- 104.Lauber W.R. Preliminary urban VHF/UHF radio noise intensity measurement in Ottawa, Canada [Текст]. / W.R. Lauber, J.M. Bertrand // 2-nd Symp. and Techn. Exh., on EMC. Montreux. 1977.
- 105.Niculita, O., Skaf, Z., Jennions, I. K., 2014. The Application of Bayesian Change Point Detection in UAV Fuel Systems. In the Proceedings of the 3rd Conference on Through-life Engineering Services, Procedia CIRP [Τεκcτ], 22, pp. 115-21. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.119.
- 106.Ma M.T. A Review of Electromagnetic Compatibility. Interference Measurement Methodologies [Текст] / М.Т. Ма, М. Kanda, М.L. Crawford, E.B. Larsen // М.: ТИИЭР. 1985. №3. С. 5-32.
- 107.Nakhla M. Special Issue on High-speed Interconnects. / M. Nakhla, Q.J. Zhang [Текст] // International Journal on Analog Integrated Circuits and Signal Processing. Vol. 5. Jan. 1994.
- 108.Parmentier J.P. Electromagnetic topology on complex systems: topological approach [Текст]. / J.P. Parmentier, G. Labaune, J.C. Alliot, P. Degauque // Interaction Note 488. May. 1988.
- 109.Pat. 3965879. Radio frequency interference suppression apparatus [Текст]. / Arthur O., Fitzner Filed; 26.05.1974.
- 110.Pat. 6437674 B1 US. Ignition apparatus having built-in noise suppression. [Текст] / Colin Hamer, Anthony Skinner, Klaus Gernert; 20.08.2002.
- 111.Pat. 6793863 B1 US. Process for producing a spark plug boot resistor assembly. [Текст] / Mark Himes, John Miller; 21.10.2004.
- 112.Petrovski S., Bouchet F., Petrovski A. Data-driven Modeling of Electromagnetic Interferences in Motor Vehicles [Tekct]. // IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA 2013) Albena, Bulgaria 2013. ISBN: 978-1-4799-0659-8. DOI: 10.1109/INISTA.2013.6577658. pp. 1-7

- 113.Petrovski S., Malakhov A., Kopyriulin P., Petrovski A. Adaptation of Smart Grid Technologies: The use of Computational Intelligence for reliability estimation and maintenance scheduling [Τεκcτ] / In the proceedings of the World Congress on Computational Intelligence, WCCI 2012, Brisbane, Australia. FUZZIEEE, Cat.: CPF12FUZ-USB, ISBN 978-1-4673-1505-0.DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2012.6251193. pp. 934-39
- 114.Ribbens William B. Understanding automotive electronics [Текст] / Elsevier Science. Boston (USA). 2003. p 481. ISBN 0-7506-7599-3.
- 115.RF testing facility [Текст]. / Automotive engineering. 2000. №3. С. 112-113.
- 116. Quinlan J. R. C4.5: Programs for Machine Learning [Текст]. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. 302 p. ISBN 1-5586-0238-0.
- 117.Shepherd R.A. Ignition noise of foreign and domestic vehicles in use in the United States [Текст]. / R.A. Shepherd, J.C. Gaddie. // IEEE Int. Symp. on EMC, San-Diego, Ca, USA. 1979. p. 232-238.
- 118. Taylor R. E. Airborne suweys of USA urban areas at 121,5 /243 MHz [Текст]. / R.E. Taylor, J.S. Hill. // IEEE Int. Sump. on EMC, San-Diego, Ca, USA. 1979. p. 245–251.
- 119. Tesche F.M. EMC analysis methods and computational models [Текст]. / F.M. Tesche, M. Ianoz, T. Karlsson // John Wiley and Sons. New York. 1997.
- 120.Yee K. S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. / K. S. Yee // IEEE Trans. on Antennas and Propagations. May. 1996.



| | Nº | |
|-------|----|--|
| | | |
| Ha No | OT | |

AKT

о внедрении научно-технических результатов диссертации Петровского Сергея Валерьевича

В результате решения комплекса научно-технических и практических задач, диссертантом получены результаты, нашедшие практическое применение в практике ОАО «АВТОВАЗ».

- 1. Разработанная математическая модель электромагнитных помех от системы зажигания автомобиля, применяется для разработки программного кода электронного блока управления двигателем внутреннего сгорания и оптимизации процесса его настройки. Апробация результатов выполнена путем реализации математических моделей в среде имитационного моделирования, преобразования их в программный код контроллера управления двигателем внутреннего сгорания, установленного на двигательном стенде и в составе автомобиля.
- 2. Предложенная автором концептуальная модель интеллектуального диагностического комплекса взята за основу при разработке концепции адаптивного регулирования уровня электромагнитных помех.

Главный специалист, СИВПИ ОАО «АВТОВАЗ» д.т.н.

П.А. Николаев



о внедрении

результатов диссертационного исследования в учебный процесс Петровского Сергея Валерьевича

Результаты диссертационного исследования Петровского Сергея Валерьевича выполненного на кафедре «Электрические станции» используются в учебном процессе на кафедре «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» в ходе курсового и дипломного проектирования ПО курсу «Применение микропроцессорных информационно-измерительных систем электрооборудовании автомобилей» направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электрооборудование автомобилей и тракторов».

| Заведующий кафедрой | Научный руководитель: |
|------------------------------------|------------------------------------|
| «Электромеханика и автомобильное | д.т.н., Козловский В.Н. |
| электрооборудование» | « <u>22</u> » <u>марта</u> 2016 г. |
| д.т.н Макаричев Ю.А | |
| « <u>22</u> » <u>марья</u> 2016 г. | |
| • | |
| Декан ЭТФ | Соискатель: |
| Заведующий кафедрой | <u>Петровский С.В.</u> |
| «Электрические станции» к.т.н., | «22» марти 2016 г. |
| доцент Ведерников А.С. | . * |
| «22» марта 2016 г. | |
| | |



Dr Mohamed Medhat Gaber Reader in Computer Science MSc Data Science Course Leader School of Computing Science and Digital Media Robert Gordon University Riverside East, Garthdee Road Aberdeen, AB10 7GJ United Kingdom

April 15, 2016

Samara State Technical University Novo-Sadovaya ul., 10, Samara, Samara Oblast Russia, 443100

Re: Sergey PETROVSKII Letter of Support Dear Sir/Madam

This is to confirm that I am aware and with great interest follow the research work of Petrovskii S.V., a leading engineer in the School of Electric Stations at Samara State Technical University (SamGTU), especially his research related to intelligent data analysis. It is apparent that the work he is doing is widely applicable in practice in particular, for determining electromagnetic compatibility of engine ignition systems with other electrical equipment in an automobile, but also in a wider context of technical problems requiring intelligent analysis of diagnostic data.

I am glad that through Sergey, our University maintains staff exchange and scientific collaboration with SamGTU. It is known to me that in 2013 he was at Robert Gordon University for a four-month research visit, conducting his experimental work in the IDEAS Research Institute. This subsequently resulted in the publication of three scientific papers together with my colleagues from the School of Computing Science and Digital Media.

In conclusion, I would like to express my hope that Sergey continues his research in the field of data analytics and its practical applications, and that our collaboration with him in this activity remains to be fruitful and mutually beneficial.

Yours Faithfully,

Mohamed Medhat Gaber

Mohal Guber

PhD (Monash University), MSc (University of Louisville), BSc (Sadat Academy), and FHEA

C)

Robert Gordon University, a Scottish charity registered under charity number SC013781

Диагностические данные, используемые для построения экспериментально - факторных моделей

Диагностические данные базируются на следующих спектральных распределениях напряжённости электромагнитных помех, приведённых в [50].

1. Зависимость уровня ЭМП от пробега автомобиля

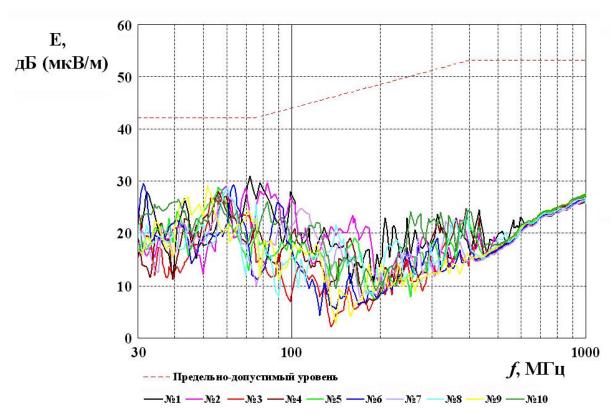


Рисунок А.1-1 Результаты измерение напряжённости ЭМП от автомобилей семейства «Приора» с пробегом менее 1000 км

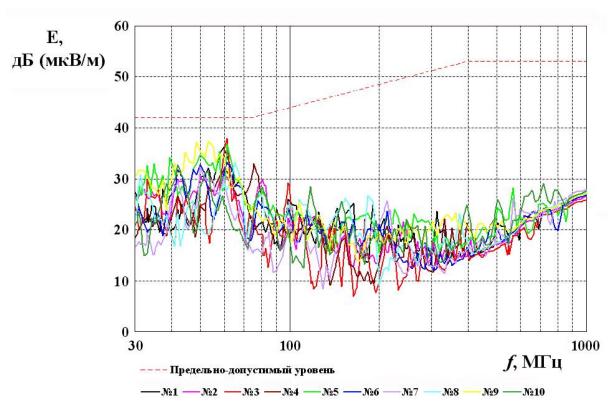


Рисунок А.1-2 Результаты измерение напряжённости ЭМП от автомобилей семейства «Приора» с пробегом от 50000 до 60000 км

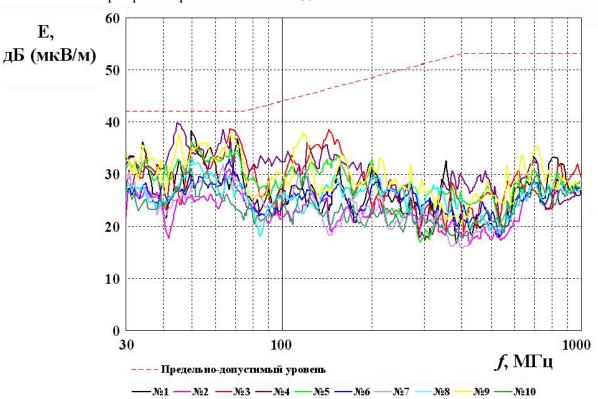


Рисунок А.1-3 Результаты измерение напряжённости ЭМП от автомобилей семейства «Приора» с пробегом от 100000 до 130000 км

2. Зависимость уровня ЭМП от типа катушки зажигания

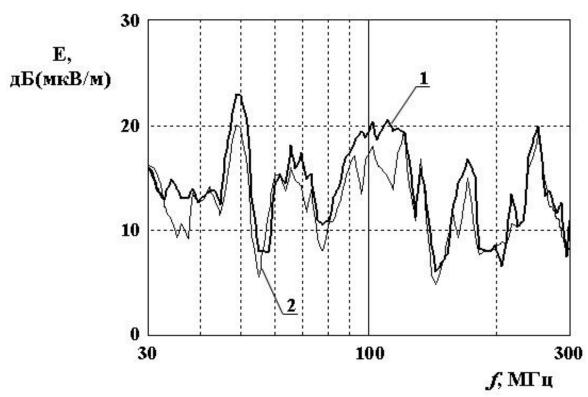


Рисунок А.2 Спектральное распределение напряжённости ЭМП от системы зажигания автомобиля ВАЗ 21101: 1 — катушка зажигания производства «Север» (Новосибирск); 2 — катушка зажигания производства «МЗАТЭ-2» (Москва)

3. Зависимость уровня ЭМП от типа топлива

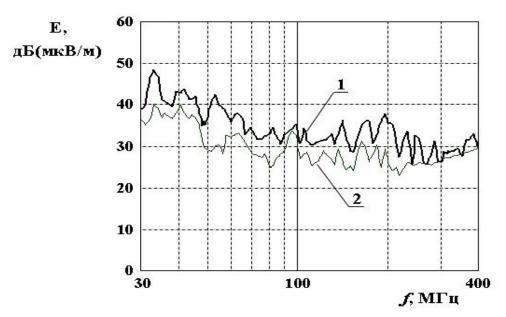


Рисунок А.3. Спектральная характеристика напряжённости ЭМП от системы зажигания автомобиля ВАЗ 2120 с карбюраторным двигателем: 1 — природный газ; 2 — бензин

4. Зависимость уровня ЭМП от числа оборотов двигателя

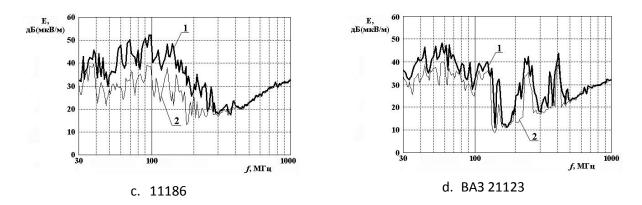


Рисунок А.4 Спектральное распределение напряжённости ЭМП от автомобилей: а) ВАЗ 11186; б) ВАЗ 21123 при 1-850 об/мин; 2-2000 об/мин

5. Зависимость уровня ЭМП от числа оборотов двигателя

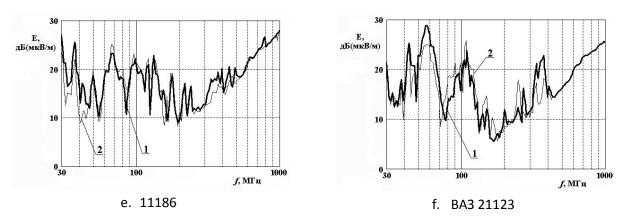


Рисунок А.5 Спектральное распределение напряжённости ЭМП от автомобилей: а) ВАЗ 21124М; б) ВАЗ 21128 при 1 – базовом УОЗ; 2 – увеличенном УОЗ для всех цилиндров

6. Зависимость уровня ЭМП от типа высоковольтных проводов (ВВП)

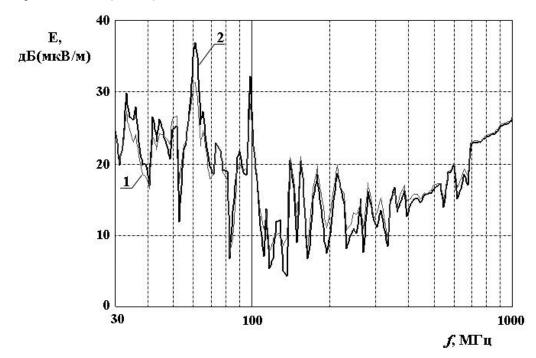


Рисунок А.6 Спектральная характеристика напряжённости ЭМП от системы зажигания автомобиля ВАЗ 21099: 1 – ВВП с активным сопротивлением; 2 – ВВП с комплексным сопротивлением

Диагностика повышенного уровня ЭМП

Диагностические данные хранятся в трёх файлах: *исходные* данные, *обучающие* пары и *тестируемые* данные.

7. Исходные данные

Рисунок А1.1 показывает форму хранения исходных диагностических выявления повышенного данных уровня электромагнитных радиопомех (ЭМП). Числовые значения соответствуют соотношению на сигнал-шум, выраженному как напряжение антенном измеряемому для различных частот в заданном интервале. Файл сохранён в директории ИДК с входными данными для интеллектуальных датчиков идентификации повышенного уровня радиопомех автомобилях: В

"../ioFiles/raw/identification/raw data.csv".

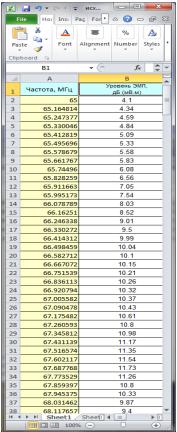


Рисунок А1.1 - Исходные диагностические данные для выявления повышенного уровня ЭМП

| | v . | | ~ | | |
|-------------|--------------------|----------------|--------|--|--|
| X | ⋈ • (□ • ∓ | o6y | y X | | |
| | ile Hoi Insi Pag | For A | _ f X | | |
| - | A A | ■ % | A | | |
| <u>"</u> | | القار لقا | | | |
| Pas | ste Font Al | ignment Number | Styles | | |
| Clipboard 5 | | | | | |
| C1 - fx - | | | | | |
| | Α | В | (_ | | |
| | Уровень ЭМП, | Превышение | ^ | | |
| 1 | дб мВ | порогового | | | |
| 2 | 4.1 | значения | | | |
| 3 | 10.1 | 0 | | | |
| 4 | 11.35 | 0 | | | |
| 5 | 7.61 | 0 | | | |
| 6 | 4.94 | 0 | | | |
| 7 | 1.91 | 0 | | | |
| 8 | 1.01 | 0 | | | |
| 9 | 2.74 | 0 | | | |
| 10 | 6.87 | 0 | | | |
| 11 | 8.09 | 0 | | | |
| 12 | 10.1 | 0 | | | |
| 13 | 10.55 | 0 | | | |
| 14 | 11 | 0 | | | |
| 15 | 9.79 | 0 | | | |
| 16 | 8.58 | 0 | | | |
| 17 | 7.37 | 0 | | | |
| 18 19 | 6.16 4.95 | 0 | | | |
| 20 | 3.74 | 1 | | | |
| 21 | 2.53 | 1 | | | |
| 22 | 1.32 | 1 | | | |
| 23 | 2.14 | 1 | | | |
| 24 | 2.97 | 1 | | | |
| 25 | 3.8 | 1 | | | |
| 26 | 4.63 | 1 | | | |
| 27 | 5.45 | 0 | | | |
| 28 | 6.28 | 0 | | | |
| 29 | 7.11 | 0 | | | |
| 30 | 7.94 | 1 | | | |
| 31 | 7.32 | 1 | | | |
| 32 | 6.7 | 1 | | | |
| 33 | 6.08 | 1 | | | |
| 34 | 5.47 | 0 | | | |
| 35 | 4.85 | 0 | | | |
| 36 | 4.23 | 0 | | | |
| 37 | 3.62 | 0 | | | |
| | | | | | |
| | шшшш 100% | | + ,, | | |

Рисунок А1.2 -Обучающие пары для ИД, выявляющих повышенный уровень ЭМП

8. Обучающие пары

Рисунок A1.2 показывает набор обработанных диагностических данных — для каждого значения напряжения шума (колонка 1) указывается (в колонке 2) превышает ли оно допустимый уровень ЭМП (символ 1) или нет (символ 0). Эти обучающие пары получены в результате предварительной обработки исходных данных, осуществляемой оператором диагностической ИИС. Файл хранится в том же директории, что и файл исходных данных: "../ioFiles/raw/identification/ training data.csv".

Предварительная обработка данных может осуществляться "вручную", с использованием статистических методов выявления аномальных значений, или с помощью имитационных программ.

Рисунок A1.3 иллюстрирует строки в коде программы интеллектуального датчика, где указываются директорий, содержащий файлы с входными данными (указатель \mathbf{A}), и сам файл исходных данных (указатель \mathbf{B}).

9. Тестируемые данные

Тестируемые значения шумового сигнала на антенне на предмет превышения им порогового уровня выбираются из исходных данных случайным образом. Выборка делается из файла исходных данных, но исключает те значения, которые использовались для формирования обучающих пар.

Тестируемые данные помещаются в директорий "../ioFiles/raw/identification/testing_data.csv", указываемый в коде программы, реализующей интеллектуальный датчик (указатель \mathbb{C}).

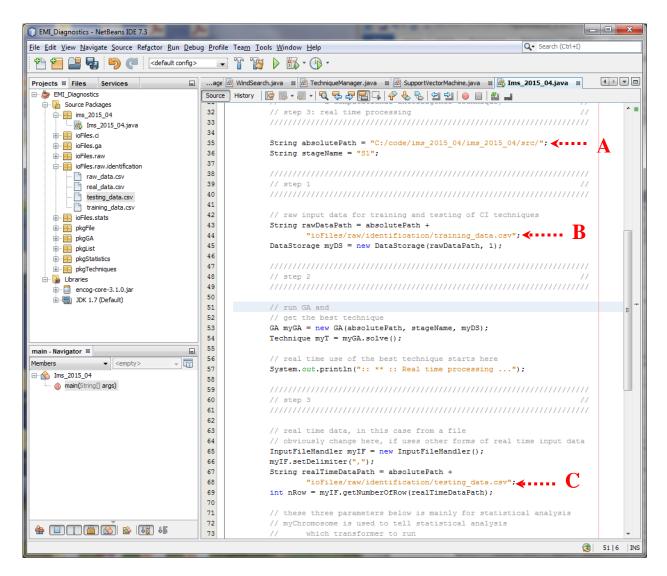


Рисунок А1.3 -Указание места хранения исходных данных в коде программы "умного" латчика

Набор интеллектуальных датчиков в диагностическом комплексе

В разработанном диагностическом комплексе имеются следующие интеллектуальные датчики (указатель **D**): Neural Network (ИНС) и Support Vector Machine (MOB), Bayesian Networks (Байесовские сети - БС), и К - Means (алгоритм ближайших соседей - АБС), код которых хранится в директории "../pkgTechniques". Набор интеллектуальных датчиков может быть расширен с помощью написания специализированного кода в среде программирования Net beans (версия 7.3) на языке программирования Java (версия 5), в соответствии с интерфейсом спецификации Technique.java (см. Приложение В-1).

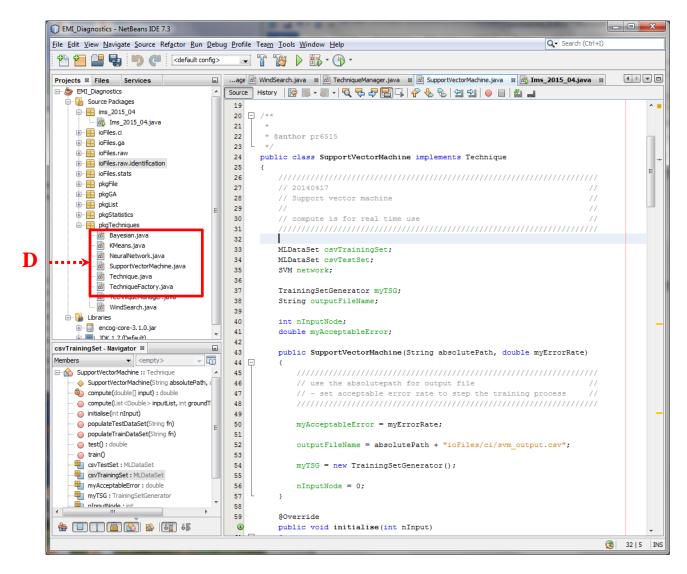


Рисунок А1.4. Набор интеллектуальных датчиков в диагностической ИИС

Программный код интеллектуальных датчиков

Ниже приведены программные коды реализации интеллектуальных датчиков (ИД) на языке программирования Java:

1. Абстрактный класс для реализации ИД

```
package pkgTechniques;
import java.util.List;
public interface Technique
   // 2015-04-17
   // общий интерфаэйс для реализации интеллектуальных датчиков
   void initialise(int n);
   void populateTrainDataSet(String fn);
   void train();
   void populateTestDataSet(String fn);
   double test();
   //-2015-04-10-//BasicNetwork getNetwork();
   //-2015-04-10-//void clone(Technique t);
   //-2015-04-10-// если нельзя получить object из CIScore
   //-2015-04-10-// то не требуется cloning
   void compute(List<Double> inputList, int gtIndex);
}
```

2. ИД на базе искусственных нейронных сетей (ИНС)

```
package pkgTechniques;
import java.util.List;
import org.encog.neural.networks.BasicNetwork;
import org.encog.neural.networks.layers.BasicLayer;
import org.encog.engine.network.activation.ActivationSigmoid;
import org.encog.ml.data.MLDataSet;
import org.encog.ml.data.MLDataPair;
import org.encog.ml.data.specific.CSVNeuralDataSet;
import org.encog.ml.train.strategy.RequiredImprovementStrategy;
import org.encog.neural.networks.training.lma.LevenbergMarquardtTraining;
import pkgFile.TrainingSetGenerator;
/**
 * @author cB∏-76
public class NeuralNetwork implements Technique
   // 2015-04-17
   // Интеллектуальный датчик на основе Искусственных Нейронных Сетей
                                                            //
   // Meтод compute() используется в режиме реального времени
   BasicNetwork network;
   MLDataSet csvTrainingSet;
   MLDataSet csvTestSet;
   TrainingSetGenerator myTSG;
   String outputFileName;
   double myAcceptableError;
   int myLocalMinimumLimit;
   int nInputNode;
public NeuralNetwork(String absolutePath, double myErrorRate,
                int myLocalMin)
      // использует absolutepath для сохранения результатов,
      // - устанавливает уровень допустимой ошибки обучения (myErrorRate) //
      // - устанавливает условия перезапуска ИНС алгоритма (myLocalMin)
      //
      network = new BasicNetwork();
     myAcceptableError = myErrorRate;
     myLocalMinimumLimit = myLocalMin;
     nInputNode = 0;
     outputFileName = absolutePath + "ioFiles/ci/nn output.csv";
     myTSG = new TrainingSetGenerator();
   }
```

```
@Override
public void initialise(int nInput)
     // устанавливает число входных нейронов = nInput
                                                    //
     // для согласования с абстрактных интерфэйсом ИД:
                                                    //
     // предполагается наличие одного выходного нейрона, при
                                                     //
     // числе скрытых нейронов, определяемых по формуле:
                                                     //
     // nHidden = (int)((nInputNode + nOutput) / 2);
                                                     //
     nInputNode = nInput;
     int nOutput = 1;
     int nHidden = (int)((nInputNode + nOutput) / 2);
     network.addLayer(new BasicLayer(null,true,nInputNode));
    network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationSigmoid(),true,nHidden));
    network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationSigmoid(),false,nOutput));
    network.getStructure().finalizeStructure();
    network.reset();
  }
@Override
public void populateTrainDataSet(String fn)
     // инициализация баз данных
     csvTrainingSet = new CSVNeuralDataSet(fn, nInputNode, 1, false);
     // предполагается наличие одного выходного нейрона
     // файл с данными не имеет заголовка
  }
  @Override
  public void populateTestDataSet(String fn)
     // инициализация тестовых данных
     csvTestSet = new CSVNeuralDataSet(fn, nInputNode, 1, false);
     // один выходной нейрон, и отсутствие заголовка у файла тестовых данных
  }
@Override
public void train()
     // обучение нейронных сетей до тех пор пока ошибка обучения
                                                      //
     // превосходит приемлемый уровень;
                                                      //
     // если нет улучшений в течение localMinimimLimit итераций
                                                      //
     // процесс обучения перезапускается для избежания преждевременной //
     // сходимости к локальному оптимуму
                                                      //
```

```
//int nTrain = 0;
       final LevenbergMarquardtTraining train =
              new LevenbergMarquardtTraining(network, csvTrainingSet);
       train.addStrategy(new RequiredImprovementStrategy(myLocalMinimumLimit));
       // избегание локального оптимума
       // int countUnimproved = 0;
       // double previousError = 99999;
       // double currentError = 0.0:
       // перезапуск процесса обучения при преждевременной сходимости
      int epoch = 1;
      do {
            train.iteration();
              if((epoch % 1000) == 0)
                  System.out.print(".");
              }
            epoch++;
              // avoid local optima
              /**if(currentError < previousError)</pre>
              {
                  previousError = currentError;
                  countUnimproved = 0; // reset counter
              }
              else
                  countUnimproved = countUnimproved + 1;
              if(countUnimproved == localMinimumLimit)
                  System.out.println("Restart NN !!!!!!!!!!!!!");
                  //train = new LevenbergMarquardtTraining(network,
                  // csvTrainingSet);
                  //network.reset();
                  countUnimproved = 0;
                  previousError = 99999;
                  currentError = 0.0;
                  train.iteration();
      } while((train.getError() > myAcceptableError) && (epoch < 10000));</pre>
     train.finishTraining();
       //nTrain = nTrain + 1; // подсчёт числа итераций
   }
@Override
public double test()
   {
       // определяется число неправильно идентифицированных данных
```

```
myTSG.openOutputFile(outputFileName);
       double tempIdeal = 0.0;
       double outputConvert = 0;
       int countIncorrect = 0;
       // test the neural network
       for(MLDataPair pair: csvTestSet )
       {
           double tempOutput = compute( pair.getInputArray() );
           outputConvert = 0;
          if(tempOutput > 0.5)
           {
              outputConvert = 1;
           }
           tempIdeal = pair.getIdeal().getData(0);
           if(tempIdeal != outputConvert)
           {
              countIncorrect = countIncorrect + 1;
           }
           double tempArray [] = pair.getInputArray();
           int length = tempArray.length;
           for(int i = 0; i < length; i++)</pre>
           {
              myTSG.writeOutput(tempArray[i], ",");
           }
          myTSG.writeOutput(tempOutput, ",");
          myTSG.writeOutput(tempIdeal, ",");
          myTSG.writeOutput(outputConvert, ",");
          myTSG.writeNewLine();
       }
       return countIncorrect;
   }
@Override
public void compute(List<Double> inputList, int groundTruthIndex)
   {
       // метод для работы в режиме реального времени
       int size = inputList.size();
       if(size <= 0)</pre>
       {
           System.out.println("
                                      --> ANN result: N/A");
           // сообщение о недостаточности обучающих данных
       }
```

```
else
       {
          double input [];
          // double ideal [] = new double [1];
          double tempOutput = -99999.0;
          if((groundTruthIndex >= size) || (groundTruthIndex < 0))</pre>
          {
              // ideal[0] = 0.0;
              input = new double [(size)];
          }
          else
          {
              input = new double [(size - 1)];
          }
          for(int i = 0; i < size; i++)</pre>
          {
              if(i == groundTruthIndex)
                  // ideal[0] = inputList.get(i);
                  // не требуется в режиме реального времени
              }
              else
              {
                  input[i] = inputList.get(i);
              }
          }
          tempOutput = compute(input);
          if(tempOutput > 0.5)
              System.out.println("
                                             --> ANN result: Anomalous");
          }
          else
          {
              System.out.println("
                                             --> ANN result: Normal");
           }
       }
   }
private double compute(double[] input)
   {
       // вызов метода compute() в пакете Encog
       double tempOutput;
       // построение одномерного массива данных
       double output[] = {0.0};
       network.compute(input, output);
       tempOutput = output[0];
       return tempOutput;
   }
}
```

3. ИД на базе метода опорных векторов (МОВ)

```
package pkgTechniques;
import java.util.List;
import org.encog.ml.data.MLDataSet;
import org.encog.ml.svm.SVM;
import org.encog.ml.svm.training.SVMTrain;
import org.encog.ml.data.MLData;
import org.encog.ml.data.MLDataPair;
import org.encog.ml.data.basic.BasicMLData;
import org.encog.ml.data.specific.CSVNeuralDataSet;
import org.encog.ml.svm.KernelType;
import org.encog.ml.svm.SVMType;
import pkgFile.TrainingSetGenerator;
/**
* @author cB∏-76
public class SupportVectorMachine implements Technique
   // 2015-04-17
                                                          //
   // Метод оперных векторов
                                                          //
                                                          //
   //
   // Meтод compute()используется для диагностики в режиме реального
                                                         //
   MLDataSet csvTrainingSet;
   MLDataSet csvTestSet;
   SVM network;
   TrainingSetGenerator myTSG;
   String outputFileName;
   int nInputNode;
   double myAcceptableError;
     public SupportVectorMachine(String absolutePath, double myErrorRate)
   {
      // использует absolutepath для сохранения результатов анализа //
      // - устанавливает уровень допустимой ошибки обучения
      myAcceptableError = myErrorRate;
      outputFileName = absolutePath + "ioFiles/ci/svm_output.csv";
      myTSG = new TrainingSetGenerator();
      nInputNode = 0;
   }
```

```
@Override
public void initialise(int nInput)
  // инициализация числа опорных векторов
  nInputNode = nInput;
  network = new SVM(nInputNode, SVMType.EpsilonSupportVectorRegression,
       KernelType.RadialBasisFunction);
}
@Override
public void populateTrainDataSet(String fn)
  // инициализация баз данных
  csvTrainingSet = new CSVNeuralDataSet(fn, nInputNode, 1, false);
  // assume 1 output and no header in the file
}
@Override
public void populateTestDataSet(String fn)
  // инициализация данных для тестирования МОВ
  csvTestSet = new CSVNeuralDataSet(fn, nInputNode, 1, false);
}
@Override
public void train()
  // обучение метода опорных векторов до состояния когда ошибка //
  // классификации становится меньше требуемого уровня
                                           //
  SVMTrain train = new SVMTrain(network, csvTrainingSet);
  int epoch = 1;
  do
  {
     train.iteration();
     if((epoch % 100) == 0)
       System.out.print("."); }
     epoch++; }
  while (train.getError() > myAcceptableError);
}
```

```
@Override
   public double test()
   {
      // Тестирование
      // определяется число неправильно классифицированных данных
      myTSG.openOutputFile(outputFileName);
      double tempIdeal = 0.0;
      double outputConvert = 0;
      int countIncorrect = 0;
      for(MLDataPair pair: csvTestSet )
      {
          double tempOutput = compute( pair.getInputArray() );
          outputConvert = 0;
          if(tempOutput > 0.5)
          { outputConvert = 1;}
          tempIdeal = pair.getIdeal().getData(0);
          if(tempIdeal != outputConvert)
          { countIncorrect = countIncorrect + 1; }
          double tempArray [] = pair.getInputArray();
          int length = tempArray.length;
          for(int i = 0; i < length; i++)</pre>
          {
             myTSG.writeOutput(tempArray[i], ",");
          }
         myTSG.writeOutput(tempOutput, ",");
myTSG.writeOutput(tempIdeal, ",");
          myTSG.writeOutput(outputConvert, ",");
          myTSG.writeNewLine();
      }
      return countIncorrect;
   }
   @Override
   public void compute(List<Double> inputList, int groundTruthIndex)
      // метод для работы МОВ в режиме реального времени
      int size = inputList.size();
      if(size <= 0)
          System.out.println("
                                  --> SVM result: N/A");}
```

```
else
       {
          double input [];
          // double ideal [] = new double [1];
          double tempOutput = -99999.0;
          if((groundTruthIndex >= size) || (groundTruthIndex < 0))</pre>
          {
              // ideal[0] = 0.0;
              input = new double [(size)];
          }
          else
          {
              input = new double [(size - 1)];
          }
          for(int i = 0; i < size; i++)</pre>
              if(i == groundTruthIndex)
                 // ideal[0] = inputList.get(i);
                 // не требуется в рабочем режиме
              }
              else
              {
                 input[i] = inputList.get(i);
              }
          }
          tempOutput = compute(input);
          if(tempOutput > 0.5)
          {
              System.out.println("
                                             --> SVM result: Anomalous");
          }
          else
          {
              System.out.println("
                                             --> SVM result: Normal");
          }
       }
   }
   private double compute(double[] input)
       // Вызов метода compute() в пакете Encog
       MLData myInput = new BasicMLData(input);
       MLData myOutput = network.compute(myInput);
       return myOutput.getData(0);
   }
}
```